

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



## **Otimização do Trânsito de Potência Reativa e Perdas em Parques Eólicos**

**José Carlos Pereira da Costa**

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. António Machado e Moura  
Coorientador: Eng.º Bruno Gata

28 Fevereiro de 2015

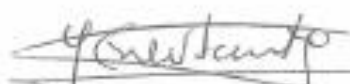


A Dissertação intitulada

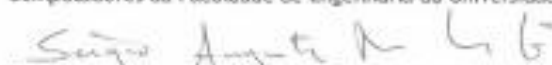
**“Otimização do Trânsito de Potência Reativa e Perdas em Parques Eólicos”**

foi aprovada em provas realizadas em 23-02-2015

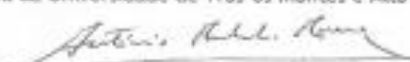
o júri



Presidente Professor Doutor José Eduardo Roque Neves dos Santos  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



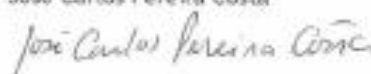
Professor Doutor Sérgio Augusto Pires Leitão  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e  
Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro



Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura  
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.

Autor - José Carlos Pereira Costa



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# Resumo

A presente dissertação está inserida no âmbito da Tese de Mestrado do curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores - Energias, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com o título Otimização do Trânsito de Potência Reativa e Perdas em Parques Eólicos.

Foi objetivo desta dissertação a criação de ferramentas para otimização do dimensionamento elétrico da rede interna de um parque eólico e dimensionamento de baterias de condensadores de forma a equilibrar os fluxos de potência reativa na rede do parque.

Ao longo da dissertação foi realizado um estudo da teoria subjacente a redes de energia, concretamente os componentes existentes na rede, como também dos métodos utilizados no estudo do dimensionamento elétrico, no cálculo de curto circuitos e perdas existentes no parque. Numa segunda fase, o estudo foca-se na Potência Reativa em Parques Eólicos, concretamente as tecnologias usadas, as implicações no SEE e o processo de dimensionamento de baterias de condensadores.



# Abstract

This work is inserted under the Master Thesis of the course of Electrical Engineering - Energy, Faculty of Engineering, University of Porto, entitled Reactive Power Optimization and Traffic Losses in wind farms.

The main goal of this work was the creation of tools to optimize the electrical design of the internal network of a wind farm and battery sizing capacitors to balance the reactive power flows in the park network.

Throughout the dissertation, it has been done a study of the theory behind energy networks, namely the existing network components, as well as the methods used in the study of the electrical design, short circuits and calculation of losses existing in the park. In a second phase, the study focuses on Reactive Power in Wind Farms. The used technologies we discuss the implications on the grid and the dimensioning process of capacitor banks.





# Agradecimentos

Quero agradecer ao Professor Doutor António Machado e Moura por me colocar em contato com os Engenheiros Bruno Gata e Pedro Freddy, da empresa CJR Wind, possibilitando a concretização de uma experiência de elevado interesse no mercado de trabalho. Além disso quero referir a disponibilidade e simpatia que sempre teve comigo ao longo do desenvolvimento da referente dissertação.

Agradeço igualmente ao Engenheiro Bruno Gata por todo o apoio e encaminhamento que me foi dando ao longo da minha permanência na empresa, como também pela transmissão de conhecimento teórico e também pelos conselhos e incentivos relacionados com o mercado de trabalho. Todos os elementos constituintes da empresa CJR Wind, não querendo destacar ninguém, pela extrema disponibilidade em ajudar-me nesta fase, por me terem aceitado e integrado de forma calorosa e amigável no seu grupo.

Reconheço o valor de todos os amigos, conhecidos, colegas, familiares que de uma forma ou outra permitiram o meu crescimento como indivíduo, aluno e como Homem.

Por último, mas não menos importante um abraço de agradecimento há minha Família e Namorada, pelo apoio nos momentos bons e nos menos bons. Muito Obrigado!



# Índice

Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos .....	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras .....	xiii
Lista de tabelas .....	xv
Abreviaturas e Símbolos .....	xvii
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução.....	1
1.1. Apresentação da Empresa - CJR Wind.....	1
1.2. Enquadramento .....	3
1.3. Motivação e Objetivos .....	5
1.4. Estrutura da Dissertação .....	6
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>7</b>
Constituição Geral de um PE .....	7
2.1. Aerogeradores .....	9
2.2. Rede de Média Tensão .....	13
2.3. Subestação .....	17
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>25</b>
Dimensionamento Elétrico de Parques Eólicos .....	25
3.1. Escolha do nível de Tensão .....	25
3.2. Escolha da Secção da Alma Condutora .....	26
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>41</b>
Controlo de Potência Reativa em PE .....	41
4.1. Dispositivos FACTS.....	44
4.2. Bateria de Condensadores .....	47
4.3. Dimensionamento de uma bateria de condensadores.....	48
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>51</b>

Caso de Estudo - Parque de Lotnisko.....	51
<b>5.1. Características do Parque</b> .....	52
5.2. Cabos, Turbinas e Transformador (Subestação de Lotnisko).....	53
Características .....	54
Cabo MT - XRUHAKXS .....	54
Cabo AT - XRUHAKXS.....	54
ALSTOM - ECO 110.....	54
5.3. Rede de Média Tensão do Parque.....	56
5.4. Aplicativo desenvolvido “DIM_WINDFARM”.....	58
Inputs.....	65
5.5. Resultados .....	66
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>75</b>
Conclusões e Trabalhos Futuros.....	75
6.1. Conclusões .....	75
6.2. Trabalhos Futuros.....	77
<b>Referências .....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo A.....</b>	<b>81</b>
<b>Anexo B.....</b>	<b>83</b>

# Lista de figuras

Figura 1-1 - Potência Instalada na Europa [MW] .....	2
Figura 1-2- Potência instalada no restante Mundo [MW].....	2
Figura 1-3- Evolução da potência instalada no Mundo .....	4
Figura 1-4- Evolução da potência instalada na Europa .....	4
Figura 2-1- Esquema geral de um parque eólico .....	7
Figura 2-2- Curva de controlo da velocidade do aerogerador duplamente alimentado .....	10
Figura 2-3- Esquema de ligações de uma MIDA .....	10
Figura 2-4- Pás do rotor.....	11
Figura 2-5- Nacelle .....	12
Figura 2-6- Cabo de energia .....	13
Figura 2-7- Esquema de um cabo unipolar e multipolar .....	14
Figura 2-8- Corte de uma subestação .....	17
Figura 2-9- Corte de um transformador de potência .....	18
Figura 2-10- Transformador de Tensão e de Intensidade .....	19
Figura 2-11- Descarregador de sobretensões .....	20
Figura 2-12- Corte de um disjuntor .....	20
Figura 3-1- Esquema equivalente de uma MIDA .....	35
Figura 3-2- Modelo de um gerador síncrono.....	35
Figura 3-3- Esquema de cálculo das correntes de curto-circuito.....	38
Figura 4-1- Curva tensão-tempo da capacidade exigida às instalações de produção eólicas para suportarem cavas de tensão .....	43
Figura 4-2- Curva de fornecimento de reativa pelas instalações de produção eólicas durante cavas de tensão .....	44
Figura 4-3 Esquema de dispositivo SVC .....	45
Figura 4-4 Esquema de um dispositivo STATCOM.....	46

Figura 5-1- Localização geográfica do PE de Lotnisko .....	51
Figura 5-2- Esquema Geral do Parque de Lotnisko.....	52
Figura 5-3- Medida adotada -Aumento da profundidade de colocação dos cabos.....	53
Figura 5-4- Cabo utilizado na rede de 30kV e 110kV .....	54
Figura 5-5 Algoritmo de Otimização da Secção do Cabo.....	59
Figura 5-6- Esquema do funcionamento do aplicativo desenvolvido .....	59
Figura 5-7- Aplicativo desenvolvido .....	61
Figura 5-8- Quadro Inicial .....	61
Figura 5-9- Definição do Layout do Parque .....	61
Figura 5-10- Escolha do tipo de ligação com a rede.....	62
Figura 5-11- Dados da Rede .....	62
Figura 5-12- Parâmetros da Rede .....	62
Figura 5-13- Características do Cabo e Modo de Instalação.....	63
Figura 5-14- Fatores de correção .....	63
Figura 5-15- Escolha do tipo de turbina .....	63
Figura 5-16- Definição das característica dos Transformadores.....	64
Figura 5-17- Definição dos inputs para o dimensionamento do cabo AT.....	64

## Lista de tabelas

Tabela 2-1- Características dos materiais condutores mais comuns.....	14
Tabela 3-1- Relação dos níveis de tensão .....	26
Tabela 3-2- Fatores de correção para a temperatura do solo .....	28
Tabela 3-3- Fatores de correção para a profundidade de colocação .....	29
Tabela 3-4- Fatores de correção da resistividade do solo .....	29
Tabela 3-5- Fator Correção - Tipo de Vala .....	30
Tabela 4-1- Fornecimento de Reativa à Rede de Distribuição .....	42
Tabela 4-2 Fornecimento de Reativa à Rede de Transporte .....	42
Tabela 5-1- Características do Solo - Lotnisko .....	52
Tabela 5-2- Informação Geral das características dos cabos de 30kV e 110kV .....	54
Tabela 5-3- Características aerogerador ECO110 .....	54
Tabela 5-4 Características do Transformador de Lotnisko .....	55
Tabela 5-5- Layout do Parque Lotnisko (parte1) .....	56
Tabela 5-6 Layout do Parque Lotnisko (parte2) .....	57
Tabela 5-7- Inputs para o dimensionamento .....	65
Tabela 5-8- Dimensionamento Elétrico (Técnico) - Lotnisko.....	67
Tabela 5-9- Dimensionamento Elétrico (Otimizado) - Lotnisko.....	69
Tabela 5-10- Perdas por Ramal - Dimensionamento Elétrico Otimizado .....	70
Tabela 5-11- Dimensionamento Elétrico - 2ª Fase de Otimização.....	70
Tabela 5-12- Níveis de Potência Reativa no ponto de ligação à rede .....	73
Tabela 5-13- Rácio de Potência Reativa no Parque de Lotnisko.....	73

Tabela 5-14- Capacidade das Baterias de Condensadores para os diferentes períodos horários .....	73
---	----



# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

SEE	Sistema Elétrico de Energia
PE	Parque Eólico
EPC	Engenharia e contratos públicos
BoP	Balanço de Equipamentos da Central
MAT	Muita Alta Tensão
AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
BT	Baixa Tensão
MIDA	Máquina de Indução Duplamente Alimentada
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
PVC	Policloreto de Vinilo
PE	Polietileno
PEX	Polietileno Reticulado
TT	Transformador de Tensão
TI	Transformador de Corrente
DST	Descarregadores de Sobretensões
V	Unidade de Medida “volt”
A	Unidade de Medida “ampere”
VA	Unidade de Medida “volt-ampere”
K1	Coeficiente de Correção da Corrente - Temperatura do Solo
K2	Coeficiente de Correção da Corrente - Profundidade de Colocação
K3	Coeficiente de Correção da Corrente - Resistividade Térmica do Solo
K4	Coeficiente de Correção da Corrente - Proximidade com outros Circuitos
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
SVC	Static VAR Compensator

STATCOM	Static Synchronous Condenser
TSC	Thyristor Switched Capacitor
TCR	Thyristor Controlled Reator
PWM	Pulse with Modulation
TSA	Transformador de Serviços Auxiliares
TP	Transformador de Potência

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo será feita uma apresentação da empresa na qual foi realizada a dissertação, um enquadramento das energias renováveis em Portugal e no Mundo, assim como a identificação dos objetivos estabelecidos e apresentação da estrutura da dissertação.

### 1.1. Apresentação da Empresa - CJR Wind

A dissertação foi realizada em ambiente empresarial, na empresa Cândido José Rodrigues - setor renováveis (CJR Wind). A possibilidade desta experiência surge com o estabelecimento de um protocolo de cooperação entre a Faculdade de Engenharia da UP e a CJR Wind.

A CJR Wind é uma empresa de serviços integrados em regime EPC/BoP, especializada na construção de parques eólicos, atuando em todas as fases de construção desde o projeto e otimização, construção civil, instalação elétrica, transporte e montagem de aerogeradores. A CJR Wind foi criada em 2002, como expansão do grupo CJR para as energias renováveis. O grupo CJR iniciou operações em 1970, crescendo de forma sustentável e afirmando-se nos mercados internacionais.

### História e Evolução do Grupo CJR

- Aluguer de Equipamento (1970);
- Empreiteiro de obras públicas (1993);
- Central de betuminosos (2000);
- CJR Espanha, CJR Polónia, CJR Roménia, CJR Angola, Terponte Angola, SGE (2007);
- CJR Brasil (2010);
- CJR Chile e CJR Sérvia (2013);
- CJR UK e CJR Alemanha (2014);

A CJR Wind apresenta, à data, 2289.7 MW instalados na Europa, distribuídos por vários países, sendo que em Portugal tem o seu maior peso de mercado, com cerca de 900MW de potência instalada.

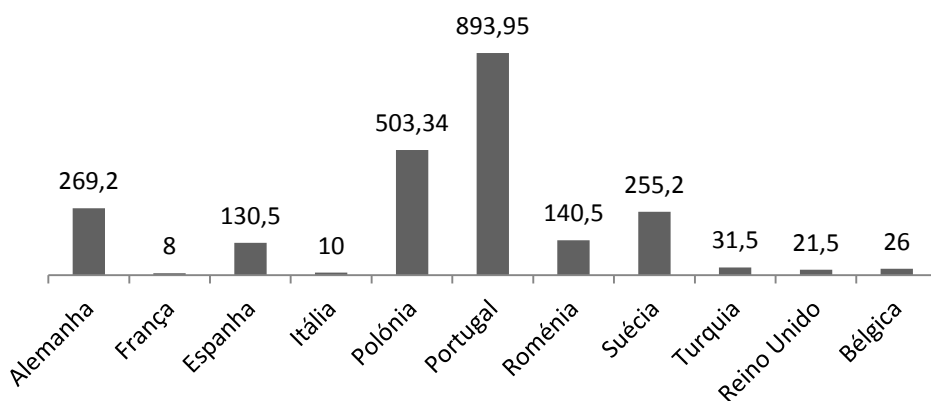


Figura 1-1 - Potência Instalada na Europa [MW]

A presença da CJR Wind verifica-se também na América Latina (Chile e Guatemala), com cerca de 170 MW instalados, correspondendo a 6% do seu portfólio. Por sua vez, as Filipinas, Jamaica e República Dominicana correspondem a uma fatia de 7% do total instalado.

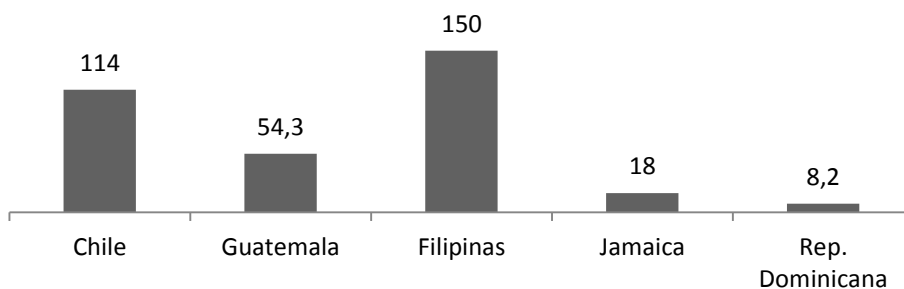


Figura 1-2- Potência instalada no restante Mundo [MW]

No vasto portfólio, o grupo detém um valor bastante considerável de parques construídos, que corresponde a 2669 MW de potência instalada.

Esta estratégia de crescimento e expansão agressiva e principalmente sustentada é definitivamente um caso a assinalar para o mercado energético nacional. O grupo CJR foi premiado este ano, na 1ª edição do ranking de internacionalizações das empresas portuguesas (RIEP), com um 7º lugar no ranking geral e 2ª posição no ranking de empresas com faturação acima de 300M€. No que respeita ao volume de receitas, assume um lugar de destaque, precedido apenas pela TAP e Inapa. Assume um respeitoso 5º lugar no que respeita ao número de subsidiárias e um 4º lugar no ranking de ativos que possui.

Com o *slogan* “Energy for Life”, o Grupo CJR trabalha no sentido de cimentar o seu lugar no mercado nacional e internacional.

## 1.2. Enquadramento

O mercado elétrico mundial é cada vez mais um aspeto de interesse e atenção. As previsões de crescimento da população mundial, segundo as Nações Unidas, apontam para que em 2050, esta seja de 9.2 mil milhões. Números um pouco assustadores quando confrontados com o número de habitantes de 2.5 mil milhões em 1950. As necessidades de produção de energia são elevadas, as alterações climáticas que se fazem sentir no planeta e as pressões políticas e económicas, tornam o objetivo de crescer de forma sustentável um problema complexo.

“O sector da energia vive um momento de revolução, na maneira como se gera, como se distribui, na relação entre a energia e a mobilidade.” - *António Mexia, Presidente Executivo da EDP*

Este desafio exige uma mudança do setor elétrico, caminho este, liderado pela Europa dos 27, através da aprovação do “Pacote Energia-Clima 20/20/20” aprovado em 17 de Dezembro de 2008, no qual os países membros se comprometem a diminuir os gases com efeito de estufa, a diminuir os consumos energéticos e a aumentar a produção com base em fontes renováveis, em 20% até 2020.

Em 2011, na Europa, a peso da energia renovável combinada era já igual à potência instalada com base em energias não renováveis, tendência esta para aumentar, segundo o afirmado no parágrafo anterior. A potência instalada renovável, segundo os dados do último

#### 4 Introdução

ano, é de 1606 GW considerando o Mundo todo, sendo que a Europa possui uma fatia de 300GW. As apostas de mais peso no mix energético são a Hídrica com cerca de 45%, e a Eólica com 26%. De ressaltar que a Hídrica é uma tecnologia mais antiga e madura, com um peso significativo nos sistemas elétricos.

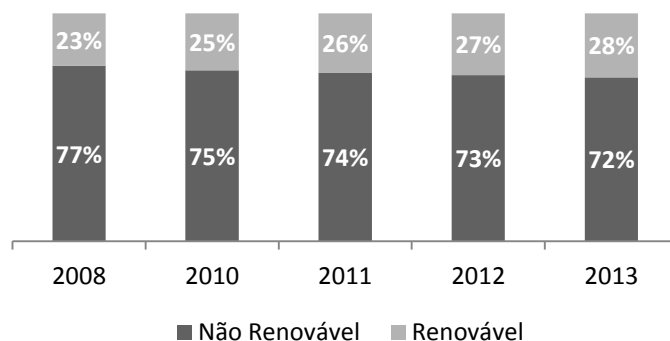


Figura 1-3- Evolução da potência instalada no Mundo

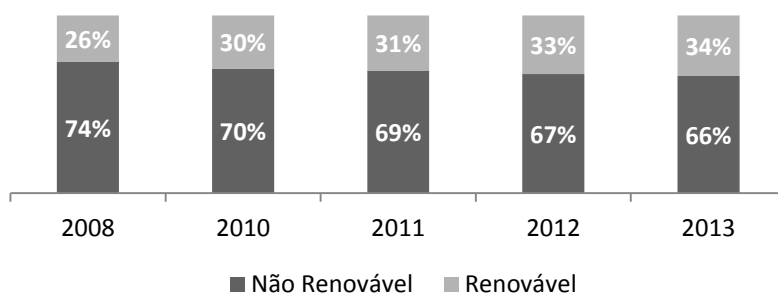


Figura 1-4- Evolução da potência instalada na Europa

Portugal é um país com escassos recursos energéticos próprios, como o petróleo, gás e carvão, conduzindo desta forma, a uma elevada dependência energética e elevada percentagem de consumo com base em importações. Esta situação torna-nos vulneráveis aos mercados estrangeiros, situação económica que aliada às metas europeias, conduz Portugal a mudar a sua estratégia de produção de energia, apostando no aumento da produção com base em fontes renováveis e diminuindo-a em fontes convencionais. A mudança de estratégia começa a ter efeitos positivos, sendo que em 2013, 57% do consumo energético teve como base a produção de energia renovável.

“... Portugal pode afirmar-se como um importante fornecedor de energia renovável no contexto europeu. Ao aliar a abundância de recursos renováveis endógenos às infraestruturas de ponta já instaladas, Portugal pode vir a fornecer energia renovável a outros estados membros da União Europeia...” - Secretário de Estado da Energia, Artur Trindade, 5 de Setembro de 2014.

Na afirmação anterior é latente a aposta no crescimento da indústria de energias renováveis em Portugal, quer numa formação especializada, como na criação de infraestruturas que suportem este crescimento, com impactos macroeconómicos relevantes.

Segundo o documento elaborado pela Delloite, “Impacto macroeconómico do setor de eletricidade renovável em Portugal”, o setor das energias renováveis foi responsável por 1.6% do PIB e pela criação, de forma direta e indireta, de mais de 40 mil empregos. Em 2013, a Eólica foi responsável por 56% da contribuição desta indústria para o PIB, o que corresponde a 1500 milhões de euros. A nível da poupança associada às emissões de gases com efeito de estufa, o ano de 2013 apresenta uma poupança de 47 milhões de Euros, equivalentes a 1 ano de emissões do parque automóvel nacional. No campo das importações, o ano 2013 fechou com uma redução de cerca de 1500 milhões de euros.

Conclui-se que a aposta no setor das renováveis é essencial, além de ser um mercado atrativo do ponto de vista económico. A aposta esta a ser feita, a rede elétrica encontra-se em fases de reestruturação permitindo o aumento significativo do mix renovável, os investidores conhecem as vantagens e desvantagens deste mercado, o país possui vasto conhecimento na área, além de um interesse político-económico de Portugal.

### **1.3. Motivação e Objetivos**

O crescimento na aposta de centros produtores de energia renovável tem sido bastante considerável, num período de tempo de alguns anos e como referido no subcapítulo introdutório, a tendência é aumentar. Esta evolução alicia cada vez mais, novos investidores, que procuram um equilíbrio de preço/qualidade, ou seja, níveis de qualidade elevados a um preço o mais barato possível, no sentido de conseguir o retorno do capital investido de forma segura e rápida. A necessidade dos investidores torna o mercado competitivo, e as empresas associadas ao mercado energético renovável mundial lutam entre si, otimizando processos, procedimentos, de forma a fechar contratos rentáveis do ponto de vista económico e estratégico.

Com base na necessidade de eliminar ou reduzir as perdas associadas aos vários processos, a dissertação apresentada consiste numa análise de parques eólicos, nomeadamente sobre as fases de dimensionamento elétrico da rede interna do parque e também do controlo de potência reativa e respetivas perdas. Esta análise visa a criação de ferramentas de trabalho, permitindo um pré-estudo das propostas recebidas de forma rápida,

correta e otimizada, pela CJR Wind e com isto aumentar a sua competitividade no mercado renovável.

### 1.4. Estrutura da Dissertação

A resente dissertação estrutura-se em 6 capítulos. No presente capítulo, é realizada uma introdução ao problema em estudo, bem como são apresentados os objetivos estabelecidos para a realização do mesmo.

No Capítulo 2 são expostas algumas questões teóricas relacionadas com o desenvolvimento do trabalho. Apresenta-se um enquadramento teórico sobre os temas em análise nos capítulos posteriores.

O Capítulo 3 é dedicado à apresentação do processo de dimensionamento elétrico de uma rede interna de um Parque Eólico.

O Capítulo 4 é reservado à exposição do processo de controlo dos trânsitos de Potência Reativa no Parque, no qual se irá apresentar o dimensionamento de uma bateria de condensadores.

No Capítulo 5 introduz-se o caso de estudo - Parque Eólico de Lotnisko (Polónia).

Para concluir, no Capítulo 6 é reservado para as conclusões da dissertação e perspectivas de trabalhos futuros.



## Capítulo 2

### Constituição Geral de um PE

Um parque eólico assenta em duas componentes, sendo uma civil e outra elétrica. No âmbito da construção civil, é responsável pela criação das vias de acesso, valas de passagem de cabos, fundações de suporte das turbinas como também da construção da subestação elevadora, caso necessário. A componente elétrica é responsável pelo funcionamento das turbinas e funcionamento da rede associada a estas, como também pela ligação da subestação.



Figura 2-1- Esquema geral de um parque eólico

A conversão da energia eólica em energia elétrica é realizada pelos aerogeradores. Estes componentes são de elevada relevância para o Parque, representado cerca de 70% do investimento total necessário para o funcionamento do centro produtor. Os aerogeradores

estão ligados entre si, em vários ramais. A energia produzida é transportada até à subestação por cabos subterrâneos, normalmente instalados em vala ao longo dos caminhos de acesso. A subestação / edifício de comando recebe a energia produzida, realizando uma elevação do nível de tensão, conseguindo desta forma, a ligação e injeção da energia produzida, na rede de transporte de energia (AT). O edifício de comando é composto por uma sala de comando e controlo do parque, e outras divisões para armazenagem de componentes e instalações sanitárias. De uma forma geral pode-se agrupar o parque nos seguintes pontos:

- Aerogeradores;
- Ligação dos Aerogeradores à rede de média tensão do parque;
- Rede de Média Tensão;
- Subestação;
- Sistemas de Controlo e Supervisão.

Estes pontos referidos anteriormente serão alvo de análise, estudo e apresentação nos subcapítulos seguintes.

## 2.1. Aerogeradores

A tecnologia utilizada em aerogeradores tem evoluído de forma progressiva ao longo dos anos, acompanhando a necessidade de maiores potências e elevados níveis de rendimento das máquinas. Em Portugal, no fim dos anos 80, início dos anos 90, as primeiras máquinas a serem instaladas eram geradores de indução com o rotor em gaiola. Esta tecnologia era a utilizada na época, a qual caracterizava os aerogeradores por serem máquinas de velocidade de rotação constante, equipadas com caixa de velocidade.

Já no fim da década de 90, começa-se a utilizar máquinas síncronas, de velocidade variável e turbinas do tipo pitch. Esta tecnologia apresenta algumas diferenças associadas ao método de controlo da velocidade de rotação, passando esta, a ser controlada através da eletrónica de potência, ao contrário da utilização de uma 'GearBox'.

Posteriormente, começam a aparecer os primeiros aerogeradores equipados com máquinas de indução com rotor bobinado. Este tipo de máquinas realiza o aproveitamento de energia desperdiçada no escorregamento, através da ligação do rotor à rede por meio de um conversor eletrónico AC/DC/AC. Por sua vez, estes geradores eólicos são equipados com turbinas do tipo pitch e com caixa de velocidades, conseguindo desta forma adaptar a velocidade da turbina à velocidade de rotação da máquina. Os geradores eólicos com este tipo de tecnologia são denominados por MIDA (máquinas de indução duplamente alimentadas), sendo a tecnologia mais usada nos tempos de hoje.

A estudo apresentado na dissertação visa também as partes constituintes de um aerogerador, constituído pelo Rotor, a Nacelle- na qual se encontram a aparelhagem utilizada na produção e transformação da energia eólica em energia elétrica- e a torre- que desempenha a função de suporte. Estes pontos serão alvo de uma análise mais pormenorizada nos subcapítulos seguintes. [1]

### 2.1.1. Máquina de Indução Duplamente Alimentada (MIDA)

A máquina de indução duplamente alimentada, ou por abreviatura, MIDA, tem como característica a possibilidade de controlo da velocidade de rotação através da variação da resistência do rotor. Como referido na contextualização sobre as tecnologias de aerogeradores e sua evolução histórica, as máquinas evoluíram de um rotor em gaiola para rotor bobinado. Esta evolução, permite o controlo da velocidade do rotor através da variação da resistência ligada em série com o enrolamento do rotor, facto este possibilitado pelo rotor ser bobinado. [1]

A curva da Figura 2-2 justifica a capacidade de controlo da velocidade neste tipo de máquinas.

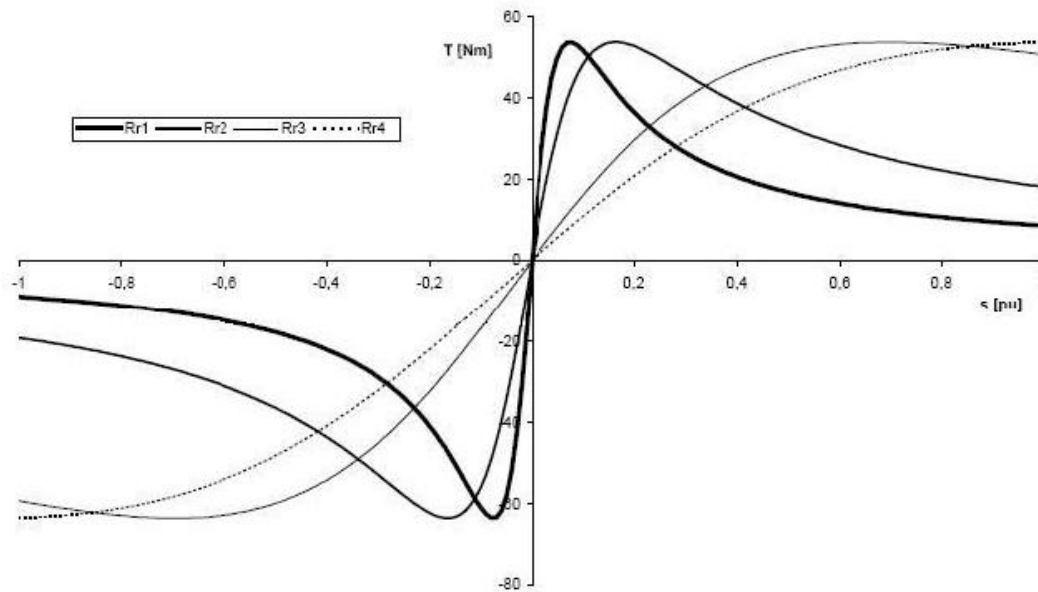


Figura 2-2- Curva de controlo da velocidade do aerogerador duplamente alimentado

Substituindo-se a resistência do rotor por um sistema de conversão AC/DC/AC ligado ao rotor, é possível transferir potência pelo rotor da máquina, tornando viável um controlo otimizado. Mais concretamente, até se atingir a intensidade de corrente nominal da máquina (no estator), a potência é controlada, maximizando a potência disponível do vento. Atingindo-se o valor nominal da corrente no estator, a potência é regulada para um valor constante. Este princípio de funcionamento caracteriza esta tecnologia. Com este método consegue-se um aproveitamento da energia de escorregamento, conseguindo-se que esta tenha um comportamento como gerador para escorregamentos positivos, ou seja, abaixo da velocidade de sincronismo.

Na Figura 2-3, apresenta-se o esquema de ligações de um aerogerador equipado com máquinas MIDA.

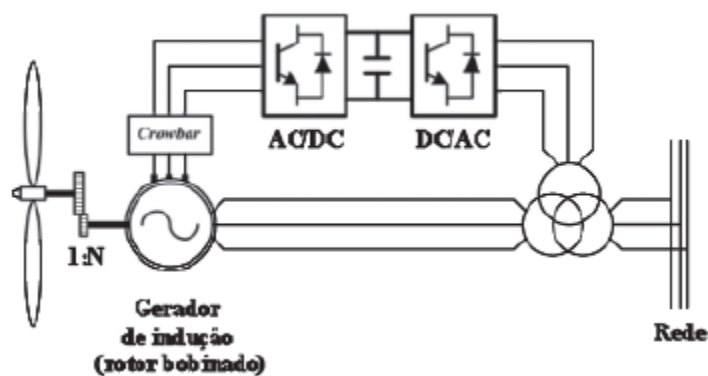


Figura 2-3- Esquema de ligações de uma MIDA

Esta máquina encontra-se diretamente ligada à rede, através do estator. Por sua vez o rotor encontra-se ligado à rede através de um sistema de conversão AC/DC/AC e de um transformador elevador. O sistema de conversão é baseado em eletrônica de potência, constituído por pontes conversoras de seis pulsos, equipados com transístores bipolares de porta isolada com um sistema de comando por modulação da largura do impulso.

O conversor, ligado ao transformador elevador, controla a tensão contínua aos terminais do condensador do subsistema de corrente contínua e controla o fator de potência no ponto comum aos circuitos do rotor e do estator. Por outro lado, o conversor diretamente ligado ao rotor da máquina de indução controla o módulo e o argumento da intensidade de corrente injetada pelo circuito rotórico.

### 2.1.2. Rotor

O desenho das pás do rotor é um fator relevância, cuja investigação e desenvolvimento é feito pelas empresas associadas a este mercado. É impreterível que o seu *design* e que o ângulo de ataque ao vento sejam estudados e executados de forma a maximizar o recurso eólico. Esta tecnologia beneficiou dos estudos e maturação da indústria aviadora; as pás do rotor são bastante influenciadas pelo design das asas dos aviões, porém ao contrário destas, são desenhadas para a rotação, e não tração.

O rotor pode-se localizar a montante da torre (*upwind*) ou a jusante desta (*downwind*), opções que apresentam algumas desvantagens e vantagens consoante as necessidades e características do local de implementação, contudo é de referir que a opção *downwind* tem vindo a ser abandonada.

Em análise neste documento estão em foco as turbinas de eixo horizontal, contudo, o mercado de turbinas tem respostas com eixos verticais. Houve também uma série de estudos no sentido de construir rotores de uma só pá, porém foram a ideia foi abandonada.

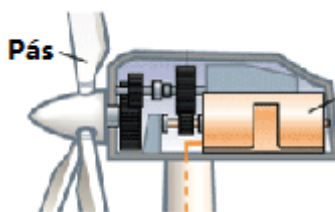


Figura 2-4- Pás do rotor

A vida útil do rotor encontra-se relacionada com os esforços a que este está exposto, influenciado pelas condições do local e pelo tempo de funcionamento. Ambicionando tempos de vida mais elevados, a escolha dos materiais que constituem as pás é relevante, podendo a escolha cair sobre a madeira, compostos sintéticos ou metal.

### 2.1.3. Nacelle

A Nacelle desempenha o papel de armazenamento e suporte dos vários constituintes, como o veio principal, o travão de disco, multiplicador de velocidade, se necessário, o gerador, entre outros. O veio principal de baixa rotação transfere o binário primário do rotor para a caixa de velocidades. O gerador é responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica. De referir que, para a transformação de energia ser máxima, o rotor deverá estar alinhado com a direção do vento. [1]

Na Figura 2-5, está uma representação de uma Nacelle de eixo horizontal, no qual se pode ver a aparelhagem que a constitui.

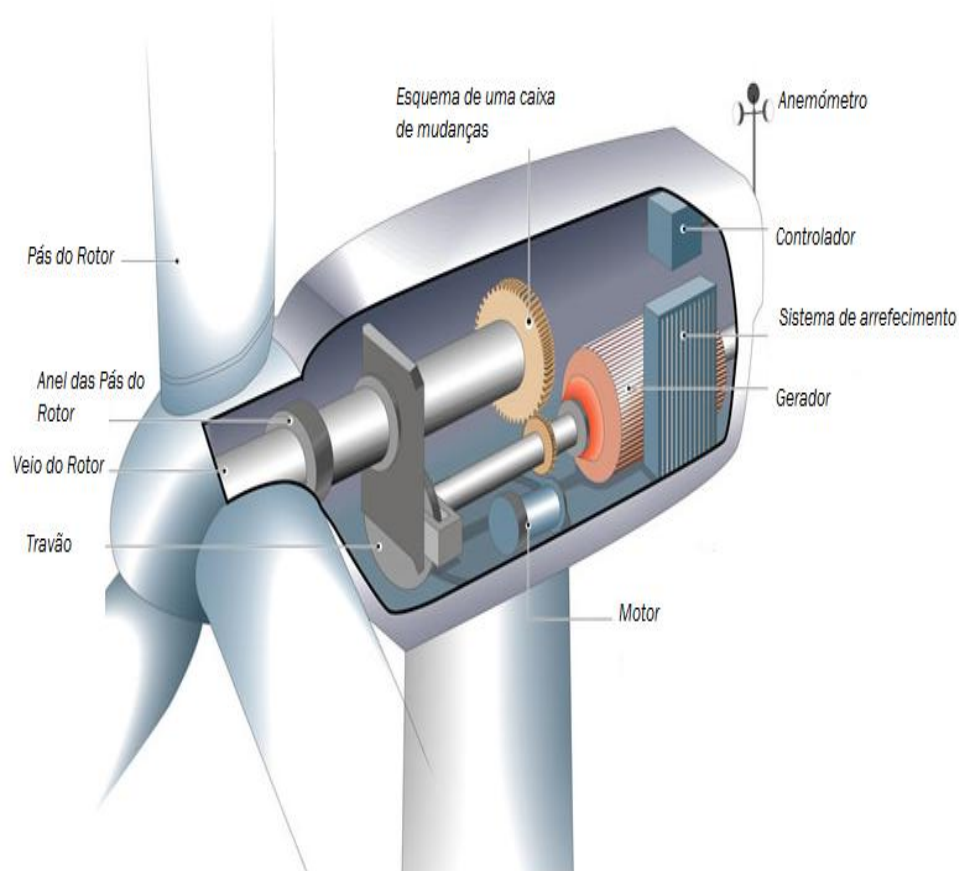


Figura 2-5- Nacelle

### 2.1.4. Torre

A torre, como já referido, realiza o suporte da nacelle e além disso, eleva o rotor à cota desejável. É necessário colocar o rotor a uma altura de forma a que a maximização do vento seja elevada, eliminando as perturbações a que poderá estar sujeita devido à envolvente.

A torre pode ter alturas com mais de 100 metros, pelo que o dimensionamento é de extrema importância. A estrutura de suporte tem que ser capaz de resistir a esforços longitudinais e verticais, conseguindo aguentar as cargas a que se encontra sujeita.

## 2.2. Rede de Média Tensão

A rede interna de um parque eólico é constituída pelos circuitos que interligam os pontos produtores - WTG, com os centros de transformação - Subestação. Estes circuitos são colocados em valas, segundo especificações e normas técnicas. A ligação entre os diferentes nós é dotada de proteções, protegendo desta forma, a aparelhagem do parque em situações de defeito.

### 2.2.1. Cabos de Energia

Um cabo de energia é constituído por um ou vários condutores de baixa resistência elétrica, que permitem transmitir a corrente elétrica com uma dada intensidade, e por uma camada isolante que se destina a separar eletricamente os condutores entre si e estes relativamente ao exterior, de forma a suportar a tensão de serviço. As condições da envolvente podem levar a que se incluam outros componentes como écrans, armaduras, e bainhas de proteção.

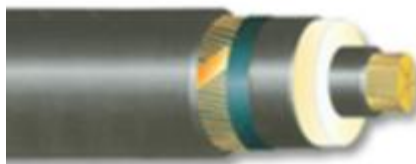


Figura 2-6- Cabo de energia

Um condutor constituído por um único fio ou por vários setores cableados é designado por cabo unipolar ou monopolar. Um cabo multipolar é formado por diversos fios cableados, eletricamente distintos, dispostos em hélice. [5]

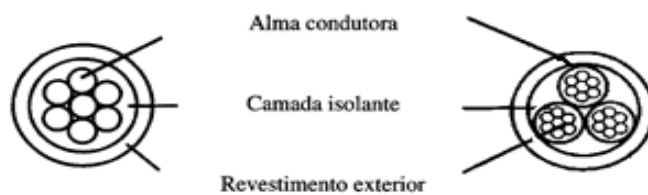


Figura 2-7- Esquema de um cabo unipolar e multipolar [5]

### 2.2.2. Alma Condutora

A alma condutora é o núcleo de transmissão de energia dos cabos elétricos, caracterizada pelo material constituinte e secção transversal. Os materiais mais comuns são o cobre e o alumínio, consequência das suas características condutoras e custo.

Tabela 2-1- Características dos materiais condutores mais comuns [3]

Características	Cobre (recozido)	Alumínio (3/4 Duro)
Grau de Pureza (%)	>99.9	>99.5
Densidade	8.89	2.703
Resistividade a 20°C ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	0.017241	0.02826
Coef. Dilatação linear ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$17 \times 10^{-6}$	$23 \times 10^{-6}$
Coef. Variação resist. Óhmica c/ temperatura ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	0.00393	0.00403
Ponto de Fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	1080	660
Condutividade ( $\text{W}/\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )	3.8	2.4
Tensão de Ruptura ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	225	125 a 205
Módulo de Elasticidade ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	26	14
Alongamento à Ruptura (%)	20 a 40	1 a 4



### 2.2.3. Camada Isolante

A isolação dos condutores desempenha um papel fundamental em matéria de segurança das condições de instalação, exploração e adequação aos fins a que se destina. A camada isolante é composta por materiais dielétricos sólidos, aplicados de uma forma geral por extrusão. Estes compostos limitam a corrente máxima em regime permanente, sendo que a espessura do isolamento varia consoante os níveis de tensão de serviço e da necessidade de uniformização do campo magnético. Desta forma, pode-se afirmar que este elemento constituinte do cabo realiza o suporte da tensão da rede, as sobretensões atmosféricas e de manobra.

Com o aparecimento dos isolantes sintéticos, a isolação a papel perde força no mercado dos cabos de média tensão. Os isolantes sintéticos podem-se dividir em duas famílias:

- Materiais termoplásticos, nos quais a temperatura provoca, de uma maneira reversível, uma variação na plasticidade. É o caso do policloreto de vinilo (PVC) e do polietileno (PE);
- Materiais elastómeros e polímeros reticuláveis, que apresentam um grande domínio de elasticidade, isto é, um comportamento elástico importante, associado a uma grande aptidão para a deformação. É o caso do polietileno reticulado (PEX). [3]

### 2.2.4. Camada Semicondutora

Os semicondutores externos e internos são camadas que se aplicam em cabos de energia, para tensões superiores a 10kV, permitindo assim criar zonas de transição entre a alma condutora e a camada isolante. A introdução deste material tem como objetivo obter uma superfície lisa entre a alma condutora e a camada isolante, limitando e orientando o campo elétrico entre a blindagem e a alma condutora.

Os tipos de materiais usados nos semicondutores, que podem ser de XLPE, PE, PVC ou EPR, dependem do tipo de isolamento do cabo. De ressaltar, que estes materiais apresentam sensibilidades diferentes a descargas parciais, concretamente o XLPE e PE são mais sensíveis que o PVC e EPR, pelo que é necessário assegurar que estas camadas semicondutoras sejam bem aplicadas, de maneira a não existirem cavidades entre elas e a camada isolante. O processo de aplicação dos semicondutores nos cabos, consiste numa aplicação simultânea, através de um tripla extrusão. [3]

### **2.2.5. Revestimentos Metálico - Blindagem ou Écran Metálico**

Os revestimentos metálicos - blindagem ou écran metálico, localizam-se sobre a camada isolante, permite o escoamento da corrente de curto-circuito monofásico da instalação. Os materiais que se utilizam são o cobre, nú ou estranhado ou o chumbo juntamente com outros materiais metálicos. Os écrans metálicos podem ser aplicados de várias formas, consoante a necessidade do escoamento das correntes de defeito fase-terra.

Esta componente é aplicada sobre uma camada semicondutora sobre várias formas:

- Uma ou várias fitas, enroladas em hélice, de maneira a que nenhum espaço livre seja visível do exterior;
- Uma fita em alumínio ou cobre de fraca espessura, colocada ao comprimento e revestida numa das faces com um produto destinado a assegurar a sua aderência à bainha exterior. Este produto é do mesmo tipo que o da bainha exterior;
- Uma fita enrolada de cobre ou alumínio, eventualmente associada a uma fita de aço também enrolada, colocada a todo o comprimento do cabo;
- Uma malha, em fios de cobre ou alumínio, enrolada em hélice, eventualmente com os fios reunidos entre si com uma fita da mesma natureza, disposta igualmente em hélice;
- Uma fita de cobre ou alumínio corrugado. [3]

### **2.2.6. Camada Hidroexpansiva de Bloqueio Longitudinal**

A camada hidroexpansiva de bloqueio longitudinal é outra componente presente nos cabos de energia, que tem a função de impedir a entrada de água, impedindo desta forma que o contato desta com o isolamento dos cabos não provoque o seu envelhecimento num espaço de tempo inferior ao previsto.

O processo de proteção que esta camada executa prende-se com a sua expansão ao longo do comprimento do cabo, bloqueando o contato da água. As bainhas devem ser aplicadas à volta da blindagem (bainha hidroexpansiva interior e exterior). A bainha hidroexpansiva interior deve ser semicondutora para orientar as linhas de campo para a blindagem. No caso de existir uma bainha metálica sobre a blindagem, a segunda fita hidroexpansiva deve também ser semicondutora. [3]

### 2.2.7. Armaduras

As armaduras asseguram a proteção mecânica do cabo, quando sujeito a esforços transversais ou longitudinais, quer durante a colocação, como ao longo da exploração. As armaduras podem desempenhar a função do écran metálico, mediante certas disposições no plano elétrico. [3]

### 2.2.8. Bainhas Exteriores

As bainhas exteriores desempenham o papel de proteção exterior do cabo, realizando, mediante a necessidade:

- Resistência mecânica, na colocação ou exploração;
- Resistência a agentes químicos, calor, frio e à propagação da chama;
- Fraca opacidade dos fumos, em caso de combustão;
- Estanquidade;
- Flexibilidade.

Os materiais mais utilizados são o policloreto de vinilo (PVC) e o polietileno (PE). [3]

## 2.3. Subestação

Nesta secção irá ser abordado a constituição geral de uma subestação de transformação, que no caso de Parques Eólicos terá a função de realizar a elevação do nível de tensão, de média tensão para alta tensão, permitindo realizar o transporte e injeção na rede.

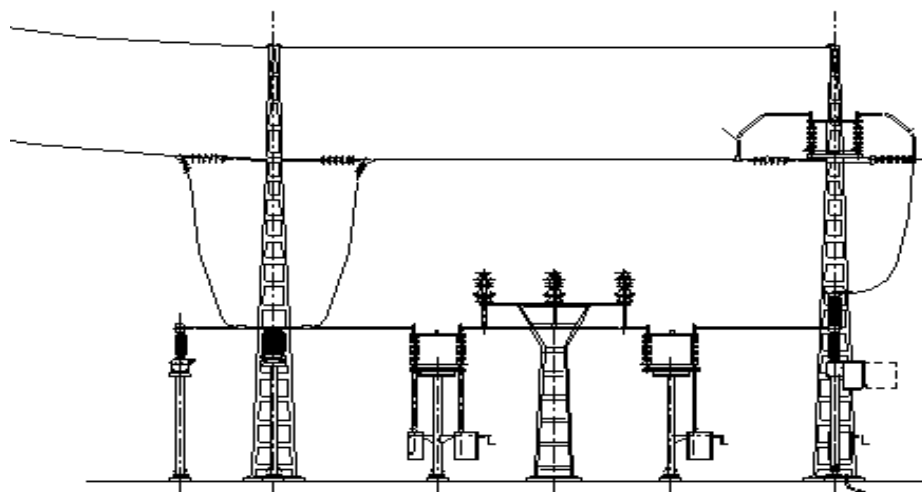


Figura 2-8- Corte de uma subestação [6]

A subestação é constituída por aparelhagem específica, introduzida posteriormente neste subcapítulo, com o objetivo de um funcionamento em conformidade do Parque, bem como da rede à qual se encontra ligado.

Verifica-se a existência de dois grupos de painéis, os AT e MT. Das celas MT, do edifício de comando, é estabelecido a ligação ao transformador de potência, elevando o potencial para o nível da alta tensão. São realizadas uma série de ligações entre os diversos constituintes da subestação até ao pórtilho, zona que permite a ligação com a rede. De forma a simplificar a compreensão do capítulo “Subestação”, divide-se este em três tópicos, sendo:

- Aparelhagem Exterior do Parque;
- Edifício de Comando;
- Equipamento Complementar.

### 2.3.1. Aparelhagem Exterior do Parque

A subestação é constituída por uma zona exterior, na qual se localiza diversa aparelhagem necessária ao seu funcionamento. Além desta, a subestação pode ser constituída por aparelhagem complementar, causado por necessidade ou imposições da rede. Porém este ponto será abordado no respetivo capítulo, denominado por “Aparelhagem Complementar”.

No Parque exterior da subestação encontram-se os painéis de AT e MT, constituídos pelo transformador de potência, transformador de tensão e intensidade, descarregadores de sobretensões, disjuntores e seccionadores.

#### 2.3.1.1. Transformador de Potência

No sistema elétrico de energia, tal como nos parques eólicos, é necessário impor determinados níveis de tensão, mediante as necessidades da rede, mantendo presente os critérios económicos e de segurança. De forma a realizar as elevações dos níveis de tensão, utilizam-se unidades de transformação, que têm por base um transformador de potência. Sendo um elemento de elevado custo, o seu dimensionamento é um processo bem ponderado.

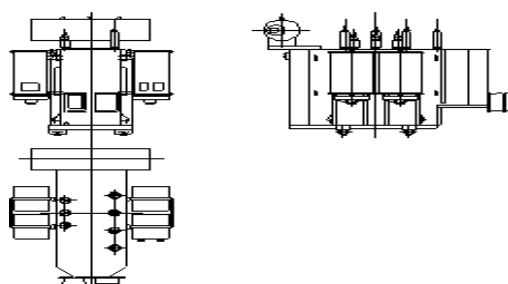


Figura 2-9- Corte de um transformador de potência [6]

### 2.3.1.2. Transformador de Medida

A função dos transformadores de medida é colocar níveis de tensão e corrente em valores suscetíveis de serem medidos em segurança. Estes dispositivos encontram-se isolados dos circuitos de alta tensão.

Numa subestação pode-se encontrar os TT e os TI, ou seja, os transformadores de tensão e os transformadores de intensidade.

Os transformadores de tensão são ligados entre fase e neutro, permitindo realizar uma medida de tensão e potência com controlo separado em relação a cada fase. Por sua vez, os transformadores de intensidade encontram-se ligados em série com o circuito onde se encontra a medida ou proteção de corrente. De referir que, os TT's possuem três enrolamentos no secundário, destinados a proteção, medida e contagem. Por sua vez, os TI's possuem quatro enrolamentos, que tal como os TT's desempenham as funções de proteção, medida, contagem. O quarto enrolamento desempenha a função de proteção diferencial do transformador de potência. Caso se verifique um defeito que danifique o TI, toda a aparelhagem a ele associada fica sem proteção, situação que ocorre porque os relés de proteção ficam sem informações do estado do sistema. Os transformadores de intensidade, devem ser capazes de suportar curto-circuitos ou sobretensões do sistema.

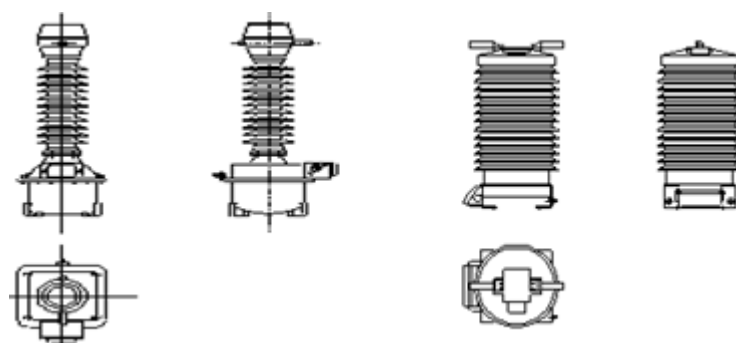


Figura 2-10- Transformador de Tensão e de Intensidade [6]

### 2.3.1.3. Descarregadores de Sobretensões

Estes dispositivos são usados para proteger os equipamentos e instalações de eventuais descargas atmosféricas e sobretensões de manobra. A escolha do tipo de DST faz-se de acordo com o nível de risco do local e da sensibilidade do material a proteger.

Os DST são responsáveis pela proteção de equipamentos, tais como o transformador de potência, que representa um elemento imprescindível para o funcionamento do sistema. Os transformadores de potência das subestações são equipados com três DST de fase, para AT, e um de neutro. Além destes, têm também três para o andar de MT.

Os DST são normalmente classificados pela capacidade de descarga da corrente.



Figura 2-11- Descarregador de sobretensões [6]

#### 2.3.1.4. Disjuntor

Os disjuntores são dispositivos de proteção, com capacidade para suportar os esforços que ocorrem quando se liga ou desliga equipamentos ou partes de instalações. Esta ação realiza-se quando existem avarias, mais concretamente em situações de curto-circuito, ou por necessidade de manobra, ou mesmo em ações de manutenção.

Estes dispositivos classificam-se de acordo com o nível de tensão, tipo de instalação e tipo construtivo.

É necessário um estudo prévio das correntes de curto-circuito, permitindo realizar um correto dimensionamento dos disjuntores. O dimensionamento deve ser ponderado, tendo em consideração um aumento futuro da potência do sistema.

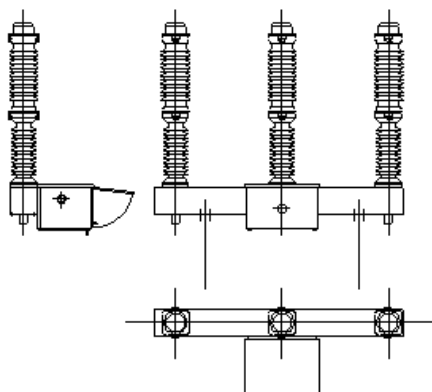


Figura 2-12- Corte de um disjuntor [6]

#### 2.3.1.5. Seccionadores

Um seccionador tem o objetivo de interromper ou estabelecer a continuidade de um condutor, ou a isolá-lo de outro condutor e que, sem poder de corte garantido, não deve ser manobrado em carga. O seccionador permite que o corte de corrente seja visível, contribuindo para garantir a segurança das manobras e das ações de manutenção e deve ser instalado para que, na posição de abertura, a ação do peso próprio das facas e dos comandos não se exerça no sentido de fecho. Caso contrario, deverá ser munido de dispositivo mecânico que impeça o seu fecho intempestivo.

### **2.3.2. Edifício de Comando**

No edifício de comando são localizados os quadros de média tensão, as baterias de tensão contínua, os retificadores, os serviços auxiliares de tensão contínua, os serviços de comunicações, posto de comando local, contagem e as unidades de proteção.

#### **2.3.2.1. Quadros de Média Tensão**

As celas de média tensão recebem as linhas MT, que irão alimentar os postos de seccionamento e de transformação, encontram-se localizadas num dos quadros no interior do edifício de comando.

#### **2.3.2.2 Baterias**

Os circuitos de comando e proteção funcionam com alimentação contínua, através do conjunto de baterias. Em caso de quebra de energia, as baterias são a reserva de funcionamento da subestação. O dimensionamento da capacidade das baterias deverá salvaguardar estas interrupções, garantindo o comando funcional da subestação, alimentação de unidades de proteção e comando dos órgãos comandáveis.

#### **2.3.2.3. Retificadores**

Os retificadores encontram-se alojados em armário, cuja função é converter a alimentação de tensão alternada em tensão contínua, usado para carregar as baterias .

#### **2.3.2.4. Serviços de Tensão Alternada**

Os serviços de tensão alternada encontram-se alojados nos armários que contêm os disjuntores de baixa tensão, que alimentam diversos circuitos na subestação. O armário é alimentado pelos transformadores de serviços auxiliares e alimenta diversos serviços, tais como a ventilação de emergência, o aquecimento dos armários no exterior, o ar condicionado, a iluminação e circuito de tomadas da subestação.

#### **2.3.2.5. Serviços Auxiliares de Tensão Contínua**

Este armário é alimentado pelas baterias de tensão contínua e depois cada circuito de tensão contínua alimenta diversos serviços, tais como as centrais de intrusão e incêndio, o PC e os diversos circuitos de comando e proteção.

#### **2.3.2.6. Comunicações**

Existe um armário onde se acomoda o equipamento de telecomunicações, que permite que a Subestação seja comandada remotamente, sem a presença física de técnicos.

#### **2.3.2.7. Posto de Comando Local**

Existe um computador localizado num armário, que faz de Posto de Comando Local, com um sinóptico igual ao do Despacho de Alta Tensão, permitindo comandar localmente os seus órgãos. É uma imagem da configuração real da Subestação, com a indicação do estado (aberto/fechado) dos seus órgãos comandáveis, tais como os Disjuntores, os Seccionadores e as Tomadas do Transformador de Potência.

#### **2.3.2.8. Contagens**

Os contadores da subestação encontram-se alojados num outro armário. Existe contagem da energia que circula nos Transformadores de Potência, nos Transformadores de Serviços Auxiliares e também é medida a energia reativa das Baterias de Condensadores.

#### **2.3.2.9. Unidades de Proteção**

As unidades de proteção dos diversos Painéis recebem informações e medidas (dos Transformadores de Tensão e de Intensidade de Corrente) e avaliam em tempo real a necessidade de atuação, junto dos órgãos de corte ou nas tomadas do Transformador de Potência.

### **2.3.3. Equipamento Complementar**

O Equipamento Complementar é composto por Baterias de Condensadores, Reactância de Neutro e Transformador de Serviços Auxiliares. Estes equipamentos permitem controlar o fator de potência, limitar a intensidade de corrente de curto-circuito e alimentar os circuitos auxiliares da subestação, respetivamente.



### 2.3.3.1. Bateria de Condensadores

As Baterias de Condensadores são o equipamento utilizado para compensar o fator de potência e portanto produzir energia reativa. A energia reativa é uma energia que não produz trabalho mas que é consumida pelas máquinas assíncronas e pelos transformadores. É portanto necessário compensar esse efeito, injetando energia reativa na rede através destes condensadores. Apesar de a energia reativa não realizar trabalho, é de extrema importância, mesmo com todos os inconvenientes para traz para a rede, para a formação dos campos magnéticos nas máquinas. Como referido, o efeito desfavorável da energia reativa traduz-se numa carga suplementar sobre os constituintes da rede, afetando as quedas de tensão verificadas, as perdas de calor adicionais.

A potência reativa de um condensador é determinada pela sua capacidade, valor eficaz de serviço e frequência,

$$Q_c = U^2 \cdot w \cdot C \quad [1]$$

$$Q_c = P(\tan(\phi_1) - \tan(\phi_2)) \quad [2]$$

onde  $\phi_1$  e  $\phi_2$  são os ângulos de carga respetivamente antes e depois da compensação. Estes podem funcionar até 1.35 vezes a potência reativa fornecida por eles à tensão nominal e frequência nominal.

Uma bateria de condensadores é constituída por unidades monofásicas ou trifásicas interligadas. São ligadas em dupla estrela, e possuem uma proteção que monitoriza continuamente a corrente entre os dois pontos neutros.

### 2.3.3.2. Reactância Limitadora da Corrente

A Reactância de Neutro, é um equipamento que limita a potência a corrente de curto-circuito fase-terra a uma determinada corrente. Este equipamento caracteriza o regime de neutro, pelo que com a Reactância de Neutro se costuma associar o ‘regime de neutro impedante’. Desta forma, vai ser possível reduzir a potência de curto-circuito a níveis aceitáveis para os constituintes da subestação. A Reactância de Neutro é ligada nos secundários dos Transformadores de Potência de modo a criar uma impedância de ligação à terra.

As bobinas de reactâncias limitadoras são construídas sem núcleo de ferro, o qual iria saturar com as correntes de curto-circuito. A saturação do núcleo de ferro iria-se traduzir numa queda da indutância da bobina e conseqüente redução de proteção da mesma.

### 2.3.3.3. Serviços Auxiliares

Os serviços auxiliares compreendem serviços alimentados por corrente contínua e corrente alternada.

Para a aparelhagem auxiliar da subestação, alimentada em corrente alternada, esta é fornecida a partir do transformador MT/BT, realizando uma transformação de potencial de 15000/420 V - caso de uma rede MT com nível de tensão igual a 15kV. O transformador vai, por sua vez, ser alimentado pelo quadro geral de média tensão. O fornecimento de energia em corrente alternada tem como objetivo, essencialmente, o suporte da iluminação, circuito de tomadas, motor do regulador de tomadas e ventilação.

Em corrente contínua, os serviços auxiliares estão designados a funcionar a 110V, alimentados através de um conjunto de baterias, permitindo alimentar essencialmente aparelhos de medida, proteção e controlo. A alimentação em CC permite garantir fiabilidade ao fornecimento, em função do carácter indispensável ao correto funcionamento da subestação.

## 2.4. Sistemas de Controlo e Supervisão

Na subestação de um parque eólico é necessário o controlo do seu funcionamento e desempenho ao longo do seu período de funcionamento. É realizado o controlo da energia produzida, dos equipamentos de medida e proteção. Deste modo, o edifício de comando da subestação é constituído por um quadro de comando, dividido em vários armários. Os armários são agrupados de acordo com as suas funcionalidades e de acordo com a organização da subestação.

Os quadros de comando tipo são constituídos por um armário de Serviços auxiliares que contempla, entre outra aparelhagem, os disjuntores de Baixa tensão; Um armário de comando, desenvolvido de forma a receber toda a informação proveniente dos painéis da subestação; Um armário de contagem onde são realizadas medições de grandezas elétricas na subestação.

## Capítulo 3

# Dimensionamento Elétrico de Parques Eólicos

As características elétricas de um parque eólico são determinadas pelo tipo construtivo dos condutores, como da disposição do circuito e condições de instalação. Todo o dimensionamento elétrico deve garantir a segurança dos equipamentos e pessoas, cujos valores são controlados pela inclusão de determinados parâmetros de segurança. Os pontos referidos serão analisados nas secções seguintes.

### 3.1. Escolha do nível de Tensão

A escolha do nível de tensão do parque eólico é um parâmetro de influência na escolha do tipo de cabo a utilizar, mais concretamente na camada isolante.

A tensão estipulada, para a qual um cabo é concebido, é definido pelo conjunto de três valores, em kilovolt, sobre a forma de  $U_0/U (U_m)$ , sendo:

- $U_0$ , tensão entre um condutor e um potencial de referência (écran ou terra);
- $U$ , tensão entre dois condutores de fase;
- $U_m$ , tensão máxima que pode aparecer entre fases da rede, em condições normais de exploração. Este valor, essencialmente, considerado no âmbito da compatibilidade com a aparelhagem e os transformadores.

Além disso, a escolha da tensão estipulada dos cabos, a equipar o parque eólico, é função do tipo de cabo, tensão nominal do parque, condições de eliminação dos defeitos à terra e sobretensões.

Tabela 3-1- Relação dos níveis de tensão [3]

Tensão Nominal composta da rede (kV)	Tensão estipulada $U_0/U$ ( $U_m$ )	
	$U_0/U$ (kV)	$U_m$ (kV)
3	1.8/3 e 3/3	3.6
6	3.6/6 e 6/6	7.2
10	6/10	12
15	8.7/15	17.5
20-22	12/20 ou 12.2/22	24
30-33	18/30 ou 19/33	36
45	26/45	52

### 3.2. Escolha da Secção da Alma Condutora

A escolha da secção da alma condutora dos cabos de energia num parque eólico, ou globalmente num projeto elétrico, é um parâmetro de elevado relevo. Há a necessidade de estabelecer um compromisso entre as condições técnicas, condições económicas e condições de instalação.

O processo vai compreender três etapas:

- Determinação da intensidade a transmitir, em função das características do recetor;
- Determinar as secções mínimas que permitam respeitar a condição de aquecimento da alma condutora em regime normal e de curto-circuito e a condição de queda de tensão. Em determinados casos, a escolha da secção mínima considera também as perdas no parque;
- Escolha da secção económica.

### 3.2.1. Determinação da Intensidade a transmitir em regime normal

A determinação da corrente de serviço, em regime normal, é obtida através da formulação apresentada [3].

$$I_s = \frac{S}{U \cdot \sqrt{3}} * n \quad [3]$$

Sendo,  $I_s$  a Intensidade da corrente de serviço, em ampére (A),  $S$ , Potência aparente, em volt-ampere (VA),  $U$ , Tensão de serviço, em volt (V) e  $n$  Número de máquinas no ramal, visto para montante.

### 3.2.2. Secção necessária para aquecimento em regime permanente

A intensidade máxima admissível, em regime permanente, de uma canalização, é o valor que provoca, no estado de equilíbrio térmico, o aquecimento da alma dos condutores até ao valor máximo permitido. Os fatores que influenciam são essencialmente as condições de instalação e do ambiente local em que se encontra.

Para o cálculo da secção necessária, como referido anteriormente, há fatores a considerar no cálculo das correntes. Estes fatores, de correção, vão depender, para cabos enterrados (situação verificada na rede interna de Parques Eólicos):

- Temperatura do solo ( $k_1$ )
- Profundidade de colocação ( $k_2$ )
- Resistividade térmica do solo ( $k_3$ )
- Proximidade com outros circuitos ( $k_4$ )

#### 3.2.2.1. Temperatura do Solo, $k_1$

A temperatura do solo, à profundidade de colocação, deve ser estimada com uma precisão elevada, tendo em consideração fatores como sazonalidade e a sua influência na temperatura do solo, linhas de água e outras fontes de calor. Sempre que possível, a previsão deste valor deve compreender medições durante um período de tempo suficiente. Caso a temperatura do solo apresente valores diferentes dos de referência (20°C), o cálculo de  $k_1$  é realizado segundo a formulação [4].

$$k_1 = \sqrt{\frac{\theta_1 - \theta_o}{\theta_p - 20}} \quad [4]$$

Sendo,  $\theta_p$  a - Temperatura máxima admissível, em regime permanente, para o isolante escolhido, em °C, e  $\theta_o$  a Temperatura do solo, em °C.

Os valores do coeficiente de correção podem também ser consultados na tabela 3-2, mediante o conhecimento das variáveis  $\theta_p$  e  $\theta_o$ .

Tabela 3-2- Fatores de correção para a temperatura do solo [3]

Temperatura do solo - $\theta_o$	Temperatura admissível na alma condutora em regime permanente - $\theta_p$								
	65	70	75	80	85	90	95	100	105
0	1.2	1.18	1.17	1.16	1.14	1.13	1.13	1.12	1.11
5	1.16	1.14	1.13	1.12	1.11	1.1	1.1	1.09	1.09
10	1.11	1.1	1.09	1.08	1.07	1.07	1.07	1.06	1.06
15	1.05	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.03
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97
30	0.88	0.89	0.91	0.91	0.92	0.93	0.93	0.94	0.94
35	0.82	0.84	0.85	0.87	0.88	0.89	0.89	0.9	0.91
40	0.75	0.78	0.8	0.82	0.83	0.85	0.86	0.87	0.87
45	0.67	0.71	0.74	0.76	0.78	0.8	0.82	0.83	0.84
50	0.58	0.63	0.67	0.71	0.73	0.76	0.78	0.79	0.8

### 3.2.2.2. Profundidade de Colocação, $k_2$

A influência que a profundidade de colocação dos cabos nas valas é um parâmetro de obtenção um pouco delicada. A resistência térmica exterior do cabo cresce com a profundidade, diminuindo a capacidade de transporte. Por outro lado, a temperatura do solo diminui, diminuindo a influência das variações sazonais, o que se traduz por uma resistividade térmica menor.

De um modo geral, a instalação dos cabos nas valas situa-se numa gama de profundidades entre 0.7 e 1.2m, que resulta num  $k_2 = 1$ , ou seja, despreza-se o efeito da profundidade. Contudo, para profundidades diferentes da normalizada, o fator varia, sendo apresentado na tabela 3-3.

Tabela 3-3- Fatores de correção para a profundidade de colocação [3]

Profundidade colocação (m)	Fator de correção (Secção $\leq 185\text{mm}^2$ )	Fator de correção (Secção $> 185\text{mm}^2$ )
0.5	1.04	1.06
0.7	1.02	1.04
1.0	0.98	0.97
1.5	0.95	0.93
2.5	0.91	0.88
3	0.9	0.86

### 3.2.2.3. Resistividade Térmica do solo, $k_3$

A resistividade térmica do solo é um parâmetro importantíssimo no cálculo da intensidade de corrente, visto que exerce uma diminuição sobre a capacidade de transporte do cabo, porém difícil de avaliar com precisão. Fatores como a resistividade dos materiais que constituem o solo ou mesmo a humidade, vão afetar a intensidade de corrente, de uma forma penalizadora. Em função dos diferentes fatores, podemos estruturar a resistividade do solo, mediante as suas características.

Tabela 3-4- Fatores de correção da resistividade térmica do solo [3]

Tipo de terreno	Resistividade térmica do solo (K.m/W)
Muito húmido	0.4 a 0.5
Areia húmida	0.5 a 0.7
Calcário argila - Terreno normal seco	0.7 a 1.0
Terreno muito seco	1.5
Areia seca	2.0 a 2.5
Cinzas, escória	3.0

### 3.2.2.4. Proximidade com outros circuitos, $k_4$

Nas valas, por vezes, é necessário a partilha da mesma por vários circuitos. A proximidade térmica com outras canalização de potência é um fator influenciador da capacidade de transporte de energia, pelos cabos. A consideração deste fenómeno depende de aspetos como:

- Características das canalizações colocadas na proximidade da canalização em estudo, incluindo o número de cabos colocados em paralelo, tipos, secções e dimensões dos mesmos, bem como das intensidades transmitidas;
- Disposição relativa das canalizações, nos locais onde mais se aproximam;
- Características térmicas do solo.

É possível desprezar o efeito térmico das canalizações adjacentes, caso estas se instalem lado a lado, a uma distância de 1 metro. Porém, na prática, há a necessidade de cumprir com imposições civis, tais como a largura de vala, aquecimento mútuo e risco de deterioração das canalizações vizinhas durante a colocação, o que leva a considerar distâncias inferiores a 1 metro entre os bordos mais próximos das canalizações vizinhas. Nesta situação, a capacidade de transmissão do cabo é afetada por um coeficiente, apresentado na Tabela 3-4.

Tabela 3-5- Fator Correção - Tipo de Vala [4]

Tipo de Vala	Coeficiente de Correção
Tipo 1	1
Tipo 2	0.8
Tipo 3	0.75
Tipo 4	0.7



### 3.2.3. Secção necessária para o aquecimento em caso de Curto-Circuito

Na ocorrência de um curto-circuito, o cabo será sujeito a um esforço térmico elevado, suportada pela alma condutora do cabo, sem prejuízo para a camada isolante. O tempo de passagem desta intensidade de corrente corresponde ao tempo de atuação das proteções instaladas, cujo valor será bastante reduzido, no máximo de alguns segundos.

O tempo de duração de correntes elevadas é bastante reduzido, como referido no parágrafo anterior, no qual se admite que as perdas térmicas verificadas só provocam o aquecimento da alma. Considera-se que dissipação é gradual, para o resto do cabo e meio envolvente, e posterior à eliminação do defeito. Considerando esta hipótese, é possível calcular a densidade de corrente admissível da alma, em função da duração do curto-circuito e temperaturas limites.

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt{t}} \quad [5]$$

Sendo,  $\delta$ , Densidade de corrente admissível, em A/mm<sup>2</sup>, e  $\delta_0$  a densidade de corrente admissível, de curto-circuito, com duração de 1s.

Desta forma, a secção a escolher para o cabo, é o valor normalizado imediatamente superior a:

$$S = \frac{I_{cc}}{\delta} \quad [6]$$

Sendo,  $s$ , Secção do cabo,  $I_{cc}$  a Intensidade da corrente de curto-circuito a transmitir, em A e  $\delta$  a densidade de corrente admissível, em A/mm<sup>2</sup>;

No entanto, é possível realizar uma aproximação ao método de cálculo, através da seguinte expressão:

$$S = \frac{I_{cc}}{k} * \sqrt{\frac{t}{\theta_f - \theta_d}} \quad [7]$$

Sendo,  $S$  a Secção do cabo,  $I_{cc}$  a Intensidade da corrente de curto-circuito a transmitir, em A,  $k$  o coeficiente expresso em função de  $\theta_f, \theta_d$  e da natureza da alma condutora com o valor de 7 para alumínio e 11 para cobre,  $\theta_f$ , a temperatura admissível na alma condutora, ao fim do curto-circuito, em °C e  $\theta_d$  a temperatura da alma condutora, no início do curto-circuito.

### 3.2.4. Queda de Tensão

A tensão disponível, num ponto qualquer da instalação, concretamente na rede de um parque eólico, terá que garantir um funcionamento satisfatório do sistema. A queda de tensão que se faz sentir, ou seja, a diferença entre a tensão no ponto de alimentação e o ponto de medição deve ser inferior a um valor previamente estabelecido.

Através da equação [8], é possível calcular a queda de tensão admissível para uma canalização de um parque eólico.

$$\Delta U = \sqrt{3} * l * (R * \cos\varphi + L * \omega * \sin\varphi) * I_s \quad [8]$$

Com,  $\Delta U$ - Queda de tensão, em volt;  $l$ - Comprimento da canalização, em km;  $I_s$  - Intensidade transmitida pela canalização, em A;  $R$ - Resistência aparente de um condutor, à temperatura de funcionamento, em  $\Omega/\text{km}$ ;  $L$ - Indutância aparente de um condutor, em H/m;  $\omega = 2 * \pi * f(\text{Hz})$ ;  $\varphi$ - Desfasamento introduzido, entre a corrente e tensão, pelo recetor.

### 3.2.5. Determinação da Secção Económica

O cálculo da secção mínima do cabo de energia, necessária ao cumprimento técnico, pode não ser necessariamente a melhor escolha económica. A obtenção da secção económica prende-se a fatores como a duração de vida da canalização, custo de investimento inicial e custo de exploração. Desta forma, pode-se aplicar uma metodologia de cálculo simplificada, na qual:

$$A = \frac{t_a(1 + t_a)^n}{(1 + t_a)^n - 1} \quad [9]$$

Onde,  $A$  é o coeficiente de amortização,  $t_a$  a taxa de atualização do investimento e  $n$ , o intervalo de tempo de amortização do investimento, geralmente em anos.

$$S_{económica} = K * I_s * \sqrt{\frac{H * C}{A}} \quad [10]$$

Sendo,  $S_{económica}$  a secção económica, em  $\text{mm}^2$ ,  $K$  o coeficiente associado ao tipo de alma condutora,  $I_s$  a corrente de serviço,  $H$ , utilização ponderada anual do cabo, em horas e  $C$  o custo unitário de energia, em €/kWh

A densidade de corrente económica é dada pela equação [11], em A/mm<sup>2</sup>. As perdas são formuladas em [12], dadas em kWh.

$$\delta_{económica} = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{A}{H * C}} \quad [11]$$

$$P_e = \rho \frac{L}{S} I^2 \frac{H}{1000} \quad [12]$$

Onde  $L$  é o comprimento da canalização e  $S$  a secção do cabo.

Por último, o custo total atualizado (  $C_t$  ) ao fim de  $n$  anos é dado pela expressão [13]:

$$C_t = C_i(1 + t_a)^n + (P_e * \frac{(1 + t_a)^n - 1}{t_a} * N \quad [13]$$

Onde,  $C_i$  é o custo de investimento inicial e  $N$  o número de condutores ativos.

A secção económica é independente do comprimento da canalização e dos custos fixos de instalação. A secção económica é um parâmetro de escolha secundário, visto que a prioridade é garantir as restrições técnicas. A secção económica é superior a secção técnica. O projetista deve ter em consideração este aspeto, visto que um aumento do investimento inicial pode trazer diminuição das perdas, que se refletirá no tempo de amortização deste.

### 3.2.6. Correntes de Curto-Circuito

“Curto-circuito designa um percurso de baixa impedância, resultante de um defeito, através do qual se fecha uma corrente, em geral muito elevada. Trata-se de uma situação anormal em sistemas de energia elétrica que requer ação imediata, face aos danos que dela podem resultar.” [1]

O cálculo das correntes de curto-circuito têm como objetivo um dimensionamento correto de toda a aparelhagem existente num parque, bem como dos dispositivos de proteção do sistema. O cálculo é efetuado para todos os barramentos da rede em análise, permitindo assim o conhecimento do funcionamento desta em regime de defeito. De forma a realizar o dimensionamento da secção mínima dos cabos, capaz de aguentar as correntes de defeito, é necessário em primeiro lugar, o cálculo das correntes de curto-circuito. É de referir também

que os diferentes componentes presentes na rede em análise têm uma contribuição diferente para as correntes de curto-circuito, ou seja, podem alimentar ou limitar estas correntes. As máquinas, concretamente, os aerogeradores são responsáveis por alimentar o curto-circuito, sendo este atenuado pelos transformadores e cabos.

A metodologia de cálculo é constituída por várias fases de cálculo [14], sendo estas:

- Modelização da rede e componentes em impedâncias;
- Obtenção do equivalente da rede;
- Cálculo das correntes de curto-circuito.

### 3.2.6.1. Modelização de uma Rede

Numa rede, na qual se conhece a corrente de curto-circuito trifásica, no ponto de conexão, o cálculo da impedância desta é dada por:

$$Z_k = \frac{c \cdot U_{n110}}{\sqrt{3} \cdot I''_k} \quad [14]$$

Onde,  $Z_k$  é a Impedância de curto-circuito no ponto de conexão da rede;  $c$  a constante, que para o cálculo de CC máximo toma o valor de 1.1;  $U_{n110}$ , o nível de tensão da rede;  $I''_k$  a Corrente de curto-circuito trifásica.

De forma geral, os valores da resistência da rede e da reatância não são conhecidos, de tal forma que é necessário realizar aproximações. Pode-se definir que a reatância da rede é igual ao valor da impedância calculada em [14],

$$Z_{rede} = 0 + jX \quad [15]$$

No entanto, a aproximação considerada assume um certo erro, não considerando o valor da resistência da rede, mesmo este sendo mínimo. Segundo a Norma IEC 60909, a impedância da rede é:

$$Z_{rede} = R + jX \quad [16]$$

Na qual, a resistência e reatância de curto-circuito é dado por:

$$R_k = 0.1 * Z_k \quad [17]$$

$$X_k = 0.995 * Z_k \quad [18]$$

### 3.2.6.2. Modelização de um gerador

Como referido no capítulo 2, secção 1, os aerogeradores são equipados com máquinas MIDA - (Caso de Estudo), porém para o cálculo de curto circuitos há a necessidade de as modular como máquinas síncronas, tendo em conta a necessidade de conhecer o valor da reatância. Ainda que a máquina de indução duplamente alimentada não possua reactância transitória, é calculado um equivalente, permitindo assim a sua modelação e consequente cálculo da influência da máquina nas correntes de curto-circuito.

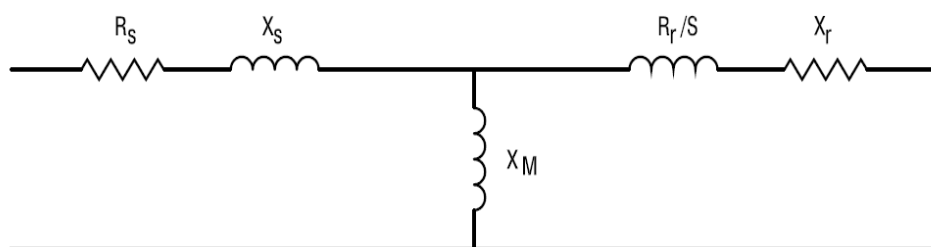


Figura 3-1- Esquema equivalente de uma MIDA

$$X'_d = X_s + \frac{X_M \cdot X'_R}{X_M + X'_R} \quad [19]$$

Deste modo, obtém-se o esquema equivalente de um gerador assíncrono como um gerador síncrono, utilizado no cálculo de curto circuitos.

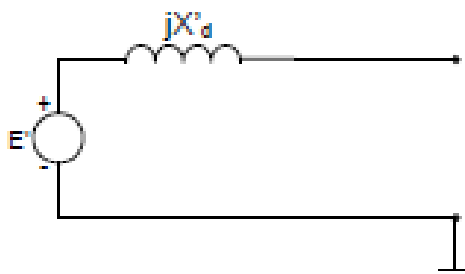


Figura 3-2- Modelo de um gerador síncrono

A adoção deste modelo despreza a resistência dos enrolamentos como as componentes da corrente de curto-circuito, para além da frequência fundamental. Desta forma, a modelização da impedância de um gerador segue a equação [20].

$$X'_{dpu} = X_{d\Omega} * \frac{S_G}{U_n^2} \quad [20]$$

### 3.2.6.3. Modelização de uma Linha

Para a modelização de uma linha aplica-se a modelo em  $\pi$ , idêntico ao usado no trânsito de energia. De ressaltar, que se pode desprezar o valor da admitância transversal para este estudo, sem cometer um erro significativo.

Impedância do cabo:

$$Z_k = R_k + j \cdot X_k \quad [21]$$

Admitância transversal da linha do cabo:

$$Y_{Tk} = j \cdot \omega \cdot C_k \quad [22]$$

Impedância do cabo em p.u.:

$$Z_{linha} = l * Z_{linha,\Omega} * \frac{1}{Z_b} \quad [23]$$

### 3.2.6.4. Modelização de um Transformador

Componente ativa da tensão de curto-circuito:

$$u_R = \frac{\Delta P_{Cu}}{S_T} \quad [24]$$

Onde,  $\Delta P_{Cu}$  é a Potência de perdas no cobre e  $S_T$ , a Potência aparente do transformador.

A componente reativa da tensão de curto-circuito é dada pela equação [25], na qual  $u_{cc}^2$  é a tensão de curto circuito do transformador, em %.

$$u_X = \sqrt{u_{cc}^2 + u_R^2} \quad [25]$$

Com as componentes ativa e reativa da tensão de curto-circuito, obtêm-se os valores da resistência e reatância deste, como formulado nos pontos seguintes, no qual a resistência e a reactância são dadas pelas equações [26] e [27], respetivamente.

$$R_T = u_R * \frac{U_T^2}{S_T} \quad [26]$$

$$X_T = u_X * \frac{U_T^2}{S_T} \quad [27]$$

### 3.2.6.5. Bateria de Condensadores

Visto que o estado considerado para o estudo dos curtos circuitos corresponde ao pré-defeito, desprezam-se os elementos transversais, como as baterias de condensadores. Caso existissem cargas, estas seriam também desprezadas, pois afetam as correntes de curto-circuito de forma pouco significativa.

### 3.2.6.6. Redução da Rede

No estudo das correntes de curto-circuito num parque eólico, considera-se a rede em vazio, num estado de pré defeito, com um perfil de tensão igual à tensão nominal ou igual a 1.05 a tensão nominal (perfil de tensão de segurança), salvaguardando a influência dos parâmetros desprezados. Em redes de parques eólicos, que apresentam uma estrutura radial, pode-se substituir a rede a montante do defeito por um barramento de impedância equivalente. A impedância de curto-circuito,  $Z_{cc}$ , é calculada através dos dados fornecidos pela rede, ou seja, em função da potência de curto-circuito.

$$S_{cc} = \frac{1}{Z_{cc}} \quad [28]$$

### 3.2.6.7. Cálculo das Correntes de Curto-Circuito

Em redes de dimensão reduzida, o cálculo das correntes de curto-circuito podem ser obtidas de forma relativamente simples e rápida, através de reduções da rede. Para situações em que o engenheiro é confrontado com redes de grandes dimensões, é necessário recorrer à computação digital, baseada em algoritmos de cálculo.

Desta forma, para calcular as correntes de curto-circuito, segue-se o seguinte esquema equivalente de rede, no qual a impedância equivalente é dada pela formulação [29].

$$Z_{eq_{Montante}} = \sqrt{(R_{U30} + R_{L30} + R_{T30} + R_{LSN})^2 + (X_{U30} + X_{L30} + X_{T30} + X_{LSN})^2} \quad [29]$$

Onde,  $R_{U30}$  e  $X_{U30}$  são a resistência e a reatância da rede,  $R_{L30}$  e  $X_{L30}$ , a resistência e a reatância da linha de AT,  $R_{T30}$  e  $X_{T30}$ , a a resistência e a reatância do transformador de potência e  $R_{LSN}$  e  $X_{LSN}$ , a resistência e reatância da rede MT.

Sendo,

$$I_{cc_{montante}} = \frac{1}{Z_{eq_{Montante}}} \quad [30]$$

Com a impedância equivalente do conjunto transformador/aerogerador constante, visto que os aerogeradores são todos iguais, a corrente de curto-circuito é dada por:

$$I_{cc_{Jusante}} = n * \left( \frac{1}{Z_{WTG}} \right) \quad [31]$$

A corrente de curto-circuito em cada ponto será dado pela soma das duas correntes calculadas.

$$I_{cc_{WTG}} = I_{cc_{montante}} + I_{cc_{Jusante}} \quad [32]$$

O esquema, da figura 3-3, exemplifica o modelo adotado no cálculo dos curtos circuitos. Calcula-se o equivalente da rede, conforme [29]. A corrente de curto-circuito de jusante vai depender da distância e número de aerogeradores vistos para montante do barramento em análise, segundo [31]. O objetivo final, concretamente, a intensidade do curto-circuito será obtida conforme [32].

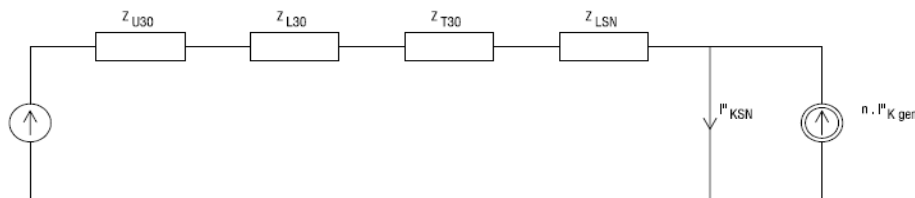


Figura 3-3- Esquema de cálculo das correntes de curto-circuito



### 3.2.7. Perdas

O estudo de perdas em qualquer instalação elétrica está associado a um bom uso de energia, ou seja, a um uso sustentável, eficaz, com um baixo valor de desperdício. O cálculo das perdas depende do número e qualidade das medidas elétricas existentes. De uma forma geral, todos os parques eólicos têm aparelhagem de medida em todos barramentos de geração - Aerogeradores- e no ponto de interconexão com a rede, porém torna-se um pouco complicado a sua medição com exatidão provocado pela irregularidade do recurso, falta de dados, etc.

Nesta dissertação estará em foco a detecção das zonas de maiores perdas nos parques, como da influência que a aparelhagem existente, como cabos, transformadores e aerogeradores, têm no funcionamento eficaz da rede de um parque.

As perdas elétricas, na sua maioria, ocorrem nas linhas, cabos, transformadores e geradores, nos quais flui corrente, causando o aparecimento do efeito de Joule. As perdas são função do quadrado da corrente que circula nestes elementos, traduzindo-se pela dissipação de calor.

As perdas podem ser:

- Perdas de potência, as quais traduzem a diferença entre a potência de entrada e a potência de saída, para um determinado intervalo de tempo,  $\Delta t$ ;
- Perdas de energia, traduzidas pela diferença entre a energia produzida e energia recebida no ponto de receção;

Quanto à sua origem, podem ser:

- Perdas técnicas, resultantes do transporte e transformação da energia elétrica. Neste grupo considera-se as perdas por efeito de Joule e as perdas no ferro dos núcleos magnéticos dos transformadores. Pode-se considerar as perdas por efeito de coroa, porém o seu efeito é mais relevante para as redes de transporte, não para os centros produtores;
- Perdas não técnicas, associadas à potência entregue à rede, que não é totalmente contabilizada. Esta diferença entre a produção efetiva e a contabilização desta advém dos erros associados às aparelhagens de medida e contagem.

A partir da capacidade de produção de energia de cada aerogerador e da disponibilidade do recurso, na zona de implementação do parque, o cálculo das perdas totais

é dado pelo somatório das perdas parciais. A aparelhagem constituinte do parque, como transformadores e cabos apresentam perdas na elevação do nível de potencial e na transmissão de energia, respetivamente.

As perdas de potência num parque eólico são parâmetro de análise com algum enfase, sendo por vezes, restrição imposta pela *Utility* ou pelo Cliente.

$$\Delta P_{TOTAL} = m. \Delta P_{Transformador.Aerogerador} + \sum_{i=1}^n \Delta P_{circuito} + k. \Delta P_{transformador.subestação} \quad [33]$$

Sendo,  $m$ ,  $n$  e  $k$ , o número de aerogeradores, circuitos e transformador de potência do parque, respetivamente.

### 3.2.7.1. Perdas nos cabos

As perdas elétricas verificadas são função de alguns parâmetros, tais como a distância, resistência do cabo e pela corrente que flui neste. Segundo a equação [34] é possível calcular as perdas elétricas.

$$P = R_{CABO} * I^2 \quad [34]$$

### 3.2.7.2. Perdas em Transformadores

As perdas verificadas nos transformadores podem ser divididas em dois grupos, sendo as perdas no ferro e as perdas as perdas no cobre.

$$P_{Transformador} = P_{fe} + P_{Cu} \quad [35]$$

As perdas no ferro são constantes, independentemente do nível de carga, porém as perdas no cobre variam conforme o regime de produção. Visto que, as perdas no ferro não variam com o regime de carga, procedemos à formulação do segundo grupo de perdas, as perdas no cobre, dadas pela equação [36], onde  $P$  é a potência produzida por aerogerador,  $P_n$ , a potência nominal do transformador e  $u_{cc}$ , a potência de curto-circuito do transformador.

$$P_{Cu} = \left( \frac{P}{P_n} \right)^2 * u_{cc} \quad [36]$$

## Capítulo 4

# Controlo de Potência Reativa em PE

Num dado sistema de energia, circula uma determinada potência aparente, composta pela potência ativa e potência reativa. Para o caso de um parque eólico, a potência é produzida pelos aerogeradores, transformando o recurso renovável, vento, em energia. Desta forma, a potência produzida é o resultado da equação seguinte,

$$S = 3 * U_f * I_f^*$$

Onde,  $U$  e  $I$  representam a tensão e a corrente por fase.

Donde, a potência ativa e a potência reativa:

$$P = \{R_e(S)\} = 3 * U_f * I_f^* * \cos \emptyset$$

$$Q = \{I_m(S)\} = 3 * U_f * I_f^* * \sin \emptyset$$

Algumas máquinas elétricas necessitam de energia reativa para o seu funcionamento, mais concretamente para a criação do seu campo magnético. Exemplo destas máquinas são as máquinas de indução, caso em estudo na dissertação. A potência reativa é consumida- natureza indutiva- e produzida- natureza capacitiva- pelas cargas, geradores e linhas.

De acordo com a legislação em Portugal, todos os produtores em regime especial, ligados à rede de distribuição, devem fornecer uma determinada quantidade à rede de energia reativa, apurada em intervalos de tempo de sessenta minutos, de acordo com a tabela 4-1.

Tabela 4-1- Fornecimento de Energia Reativa à Rede de Distribuição [10]

Un - Ponto Conexão com a Rede	<i>tg <math>\phi</math></i>	
	Horas CP	Horas VS
AT	0	0
MT (P>6MW)	0	0
MT (P<6MW)	0.3	0
BT	0	0

Relativamente aos valores apresentados na tabela anterior, admite-se uma tolerância de cerca de 5% no fornecimento, para o mesmo período de tempo.

Para produtores em regime especial, ligados à rede de transporte, a injeção de energia reativa tem que respeitar o imposto na tabela seguinte, de acordo com o período considerado anteriormente - sessenta minutos.

Tabela 4-2 Fornecimento de Energia Reativa à Rede de Transporte [10]

Un - Ponto Conexão com a Rede	<i>tg <math>\phi</math></i>	
	Horas CP	Horas VS
MAT	0.2	0
AT	0.2	0

A produção de energia, em parques eólicos, com todos os aspetos positivos associados, conduz a impactos da rede elétrica, nomeadamente na rede de transporte e distribuição. Grandes parques, com capacidade para estarem ligados à rede de transporte, usualmente localizam-se em zonas remotas, devido às suas dimensões e impacto ambiental. Visto a tensão ser uma grandeza local, o seu controlo torna-se um pouco complicado pelas centrais convencionais e sendo a tendência, afastar os grandes parques das zonas de consumo, há a necessidade de realizar algumas compensações dos níveis de tensão, através da inclusão de aparelhagem para o efeito.

A rede de distribuição é, como a rede de transporte, afetada pela introdução da produção descentralizada. A introdução de novos pontos de produção afeta os trânsitos de energia nos ramos da rede, tornando-se uma tarefa delicada para o operador da rede, considerando o carácter imprevisível do recurso. Estas fontes de energia não são controláveis, as variações de correntes nos ramos e consequentemente as variações de tensão nos nós aumentam. Teoricamente, considerando a introdução de mais geradores na rede de distribuição, poder-se-ia aumentar a possibilidade de controlo de tensão, contudo o modelo de funcionamento destes pode não ser igual aos geradores ligados à rede de transporte. Nem

sempre os geradores têm a capacidade de variar a geração de potência reativa e a inclusão de aparelhagem para esse efeito, além de dispendiosa, pode provocar uma energização da rede numa situação não desejada.

Além das imposições legais do nosso país e dos impactos na rede elétrica, há que considerar o fenómeno *Fault Ride-Through Capability*, que representa a capacidade de resistir, pelos parques, a situações de defeito, sem afetar a rede. A ocorrência de curto-circuitos pode colocar em risco a segurança e dinâmica de operação da rede, resultado da perda de volumes consideráveis de produção. Estas situações ocorrem, resultado da incapacidade dos aerogeradores tradicionais, continuarem em funcionamento na sequência de uma cava de tensão. Concretamente, é imposto aos parques, uma recuperação rápida dos níveis de potência ativa e reativa aos seus valores normais.

“As instalações de produção eólica com potência instalada superior a 6MVA devem permanecer ligadas à rede durante cavas de tensão de correntes de defeito trifásicos, bifásicos ou monofásicos sempre que a tensão no lado da rede de distribuição esteja acima da curva apresentada ..., não podendo consumir potência ativa ou reativa durante o defeito e na fase de recuperação da rede.”

Segundo a Legislação Portuguesa -Diário da república, 1ª série - N.º 147 - 30 Julho de 2010

Deste modo, é necessário uma injeção de energia reativa realizando o suporte da tensão. A figura 4.1 representa os requisitos de sobrevivência a cavas de tensão.

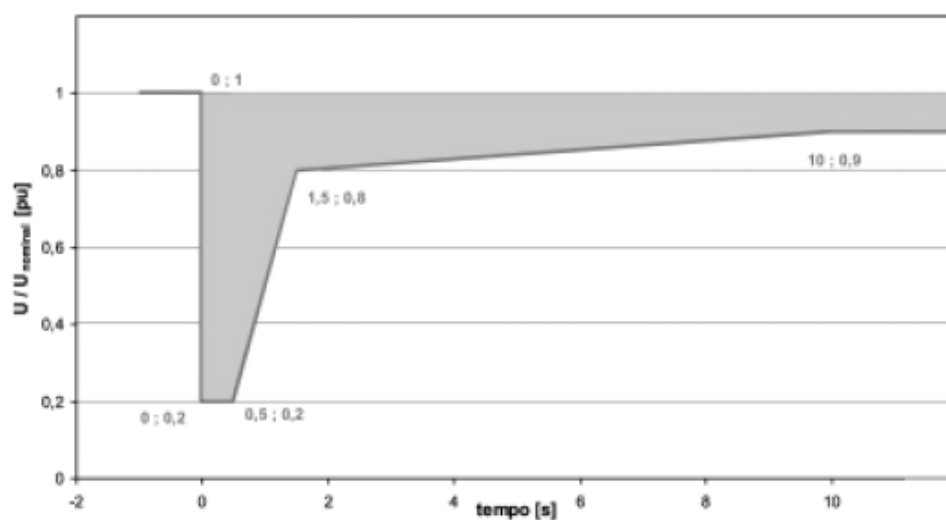


Figura 4-1- Curva tensão-tempo da capacidade exigida às instalações de produção eólicas para suportarem cavas de tensão [10]

As instalações devem fornecer corrente reativa durante cavas de tensão, de acordo com a figura 4-2, proporcionando desta forma suporte para a tensão da rede. O cumprimento da curva de produção mínima de corrente reativa durante cavas de tensão, deve no máximo, iniciar-se com um atraso de 50ms após a deteção da cava de tensão.

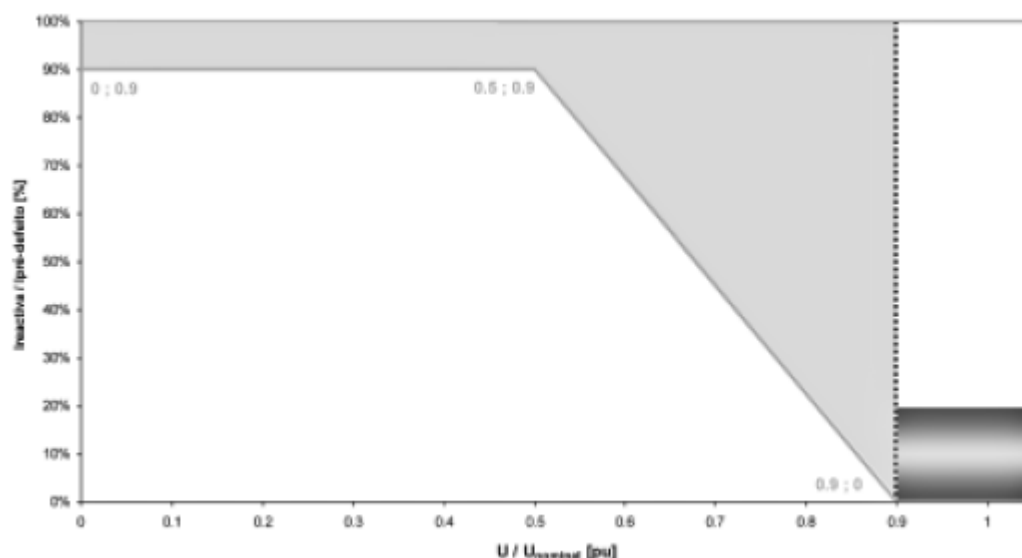


Figura 4-2- Curva de fornecimento de reativa pelas instalações de produção eólica durante cavas de tensão [10]

## 4.1. Dispositivos FACTS

A utilização de aparelhagem complementar em parques eólicos permite a melhoria na capacidade de sobrevivência a situações de defeito, não perdendo grandes volumes de produção. Os dispositivos, FACTS, permitem dotar o parque desta capacidade. Deste modo, analisaremos dois tipos de dispositivos baseados em eletrónica de potência- o SVC e o STATCOM.

### 4.1.1. Dispositivos FACTS - SVC

*SVC - Static Var Compensator*, baseado num conjunto de elementos reativos, baterias e ou reatâncias, controlados por dispositivos de eletrónica de potência com comutação natural de linha (usualmente tirístores) e que permitem ajustar dinamicamente a potência reativa injetada na rede, para efeitos de controlo de tensão. A capacidade de resposta a cavas de tensão é limitada, dada a reduzida capacidade de controlo proporcionada pelos tirístores. No entanto, são opções técnicas e economicamente interessantes para o controlo de tensão/potência reativa em regime de funcionamento normal. É usual a utilização de um

transformador MT/AT com os equipamentos ligados no lado MT, conforme o apresentado na figura 4-3.

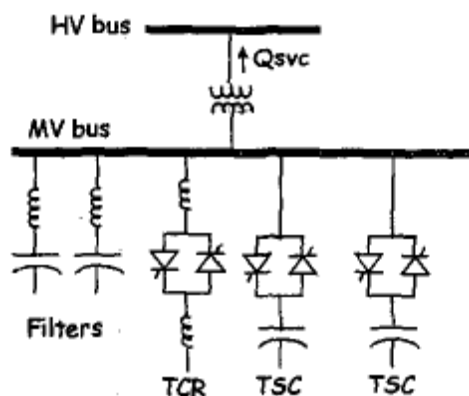


Figura 4-3 Esquema de dispositivo SVC

Na figura 4-3, é possível observar a existência de dois TSC e um TCR. O TSC é constituído por um condensador, ligado à rede através de tirístores, os quais, possuem capacidade para ligar e desligar o condensador da rede, numa situação em que a corrente que o atravessa é nula. A corrente a ser injetada pode ser controlada por um ângulo de disparo definido quando este entra em condução. Dependendo do ângulo de disparo, pode-se injetar corrente máxima, que vai diminuindo à medida que o ângulo de disparo aumenta. Para um ângulo de disparo de  $90^\circ$ , a corrente é nula. Desta forma, realiza a injeção de reativa na rede, quando se encontra ligado, e não injeta, quando se encontra desligado.

Por sua vez, o TCR, é constituído por uma reatância que se encontra ligada à rede por tirístores, porém apresenta um funcionamento diferente dos TSC. O ângulo de disparo dos tirístores controla a potência reativa que é consumida pela reatância, permitindo deste modo, um controlo constante da potência reativa consumida.

Consoante o referido, a capacidade de potência reativa do dispositivo de eletrónica de potência - SVC, depende da quantidade de TSC e TCR existentes, sendo que o seu dimensionamento pode ser equilibrado ou direcionado mais para o consumo ou injeção de potência reativa.

#### 4.1.2. Dispositivos FACTS - STATCOM

STATCOM - *Static Synchronous Compensator*, cujo modelo de funcionamento assenta no comando e controlo de conversão estático, com comutação forçada de linha permitindo um controlo independente da amplitude e fase da tensão que é sintetizada mediante a utilização baseadas em PWM - *Pulse With Modulation*. Desta forma, este tipo de dispositivos

apresenta elevados níveis de controlabilidade, o que permite a sua utilização na tentativa de limitar o impacto que resulta de curto-circuitos na rede.

Os controladores são instalados em paralelo, não influenciando desta forma, alterações na rede e inclusão de menos perdas, caso inseridos em série, como outros controladores. A injeção de energia reativa no sistema, para os regimes de funcionamento normal e defeito, apresenta dois modos de funcionamento. Em regime normal regulam a tensão, mantendo-os dentro dos níveis normais. Na ocorrência de curto-circuitos, procuram manter os níveis de tensão dentro dos níveis de segurança, não provocando a atuação das proteções, durante e na fase de recuperação do defeito.

No esquema seguinte é visível a configuração deste dispositivo, figura 4-4.

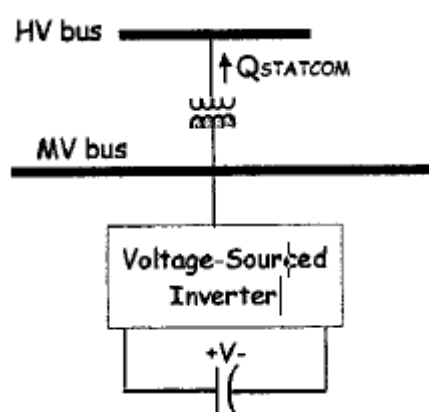


Figura 4-4 Esquema de um dispositivo STATCOM

O STATCOM realiza a regulação de tensão consoante os valores aos seus terminais, ou seja, quando a tensão na rede for baixa, o STATCOM produz potência reativa e quando a tensão na rede for alta, consome potência reativa da rede. Este dispositivo apresenta um problema associado ao atraso na resposta das malhas de controlo, sendo que pode existir a injeção de potência reativa excessiva após a eliminação do defeito, originando sobretensões. Apesar deste aspeto menos positivo que o STATCOM apresenta, a capacidade de resistir a quedas de tensão abruptas é um benefício, que são mais usuais do que as sobretensões. É uma solução a considerar para inclusão em parques eólicos.



## 4.2. Bateria de Condensadores

As baterias de condensadores são dispositivos bastante utilizados na compensação de potência reativa, principalmente pelo seu baixo custo e relativa facilidade na instalação e operação. Por norma, as baterias de condensadores são instalados no barramento de alta tensão das subestações, para situações de injeção de potência reativa. Quando o objetivo é consumir potência reativa, podem também ser instalados nos barramentos da instalação ou nas linhas de transmissão, em série ou em paralelo.

A ligação em paralelo das baterias compensa, no sentido que as perdas serão menores, para situações de plena carga. Porém, a geração de potência reativa é igual ao quadrado da tensão, logo, numa situação de queda de tensão acentuada, injetará uma quantidade menor de reativa no sistema. Em série, as baterias irão compensar a reatância indutiva das linhas de transmissão, contribuindo para o aumento do limite de transmissão de potência através da redução das respetivas perdas, além de proporcionar suporte à tensão. Como referido, para situações de queda de tensão, a injeção de potência reativa, dada pela equação seguinte, para uma configuração em série, apresentará uma capacidade de injeção superior.

$$Q_C = I^2 \cdot X_C$$

Onde,  $Q_C$  é a potência reativa gerada pela bateria de condensadores,  $I$ , a corrente que o atravessa e  $X_C$  a reatância deste.

Para situações de vazio, principalmente nas horas em que a necessidade de energia é baixa, o parque eólico terá que ter a capacidade de consumir potência reativa em excesso. O consumo desta fará descer o perfil de tensão, que se apresentará elevado, provocado baixo consumo de energia. Desta forma, as baterias de condensadores realizam o efeito oposto ao realizado, quando em situações de injeção de potência reativa. Serão usados para compensar o efeito da capacitância das linhas de transmissão, evitando sobretensões.

Consideremos também, um outro motivo, para a inclusão destes dispositivos de correção/ consumo de potência reativa numa rede. A compensação efetuada contraria o aparecimento do fenómeno “Ferranti” - Uma linha de transmissão, sem carga por um certo período de tempo, absorve a potência reativa e numa situação de abertura da linha, o

excesso de potência reativa realizará um aumento do nível de tensão nos barramentos associados.

### 4.3. Dimensionamento de uma bateria de condensadores

As baterias de condensadores, como referido, são inseridas nos sistemas de energia, permitindo a compensação da energia reativa, consumindo ou injetando. Considerando as imposições legais, no que respeita aos níveis exigidos de potência reativa no ponto de conexão com a rede de transporte, há a necessidade de conhecer as zonas onde ocorrem as perdas de potência reativa e os pontos de produção desta. Exemplo da aparelhagem em análise, temos os aerogeradores, que necessitam de energia reativa para se energizarem, as linhas e transformadores que serão responsáveis por perdas reativas. Contudo, caso os aerogeradores tenham capacidade de gerar energia reativa, serão pontos de produção.

#### 4.3.1 Estudo das necessidades de potência reativa, no ponto de conexão com a rede

De forma a compreender as necessidades de injeção de energia reativa no ponto de conexão com a rede, considera-se várias etapas. Há que conhecer a potência ativa produzida pela instalação, que no caso em estudo será um parque eólico.

$$P_{PARQUE} = n * P_{WTG_n} \quad [37]$$

Segundo a legislação Portuguesa, o produtor em regime especial tem que injetar 20% de potência ativa gerada, em reativa.

$$Q = 0.2 * P_{PARQUE} \quad [38]$$

### 4.3.2. Identificação e Formulação das zonas de produção e perdas de potência reativa

Partindo do ponto de transformação do recurso em energia elétrica, o aerogerador vai ter dupla influência no comportamento da potência reativa no parque. Por um lado, necessita de se energizar e existem perdas associadas ao transformador BT/MT. Por outro lado, e considerando que tem capacidade de produção de potência reativa, injetará na rede.

Deste modo, partindo dos valores fornecidos pelos fabricantes, obtêm-se os níveis de potência reativa, indutiva e capacitiva, nominais do aerogerador, sendo que:

$$Q_{CAPACITIVO} = Q_{MAX_{WTG(CAP)}} * n_{WTG} \quad [39]$$

$$Q_{INDUTIVO} = Q_{MAX_{WTG(IND)}} * Perdas_{WTG(Transformador)} \quad [40]$$

Os cabos, que interligam as turbinas à subestação, são responsáveis pela inserção de perdas reativas na rede.

$$\Delta Q_{IND} = I_N^2 * X_{CABO} \quad [41]$$

$$Q_{IND} = 3 * \Delta Q_{IND} \quad [42]$$

Na subestação, o transformador de potência será também um constituinte do parque responsável pelo consumo de potência reativa, ou melhor, também ele introduzirá perdas reativas no parque. De forma a contabilizar as perdas reativas, segue-se a análise, formulada pelas equações.

Determina-se a componente ativa,  $u_r$ , e reativa,  $u_x$ , do transformador, segundo as equações [24] e [25]. A reatância do transformador é dado pela substituição das equações [2] e [25], em [27].

A corrente nominal do parque,  $I_{Total_{PARQUE}}$ , é obtida através da soma das correntes que circulam nos ramais. No entanto, conhecendo os da potência total do parque, a corrente total é dada por:

$$I_{Total_{PARQUE}} = \frac{n_{WTG} * P_{WTG}}{\sqrt{3} * U_{PARQUE}} \quad [43]$$

Sendo que,

$$\Delta Q_{IND} = I_{TotalPARQUE} * X_T \quad [44]$$

No qual, as perdas reativas totais são formuladas em [45].

$$Q_{IND} = 3 * \Delta Q_{IND} \quad [45]$$

#### 4.3.3. Capacidade da bateria de condensadores

Com base nos subcapítulos anteriores, 4.1-2 e 4.1-3, a capacidade de uma bateria de condensadores é dado por:

$$Q = \sum Q_{CAP} - \sum Q_{IND} \quad [46]$$

## Capítulo 5

### Caso de Estudo - Parque de Lotnisko

O estudo visa um Parque eólico, no Norte da Polónia, localizado perto de um base aérea militar em Kopaniewo. O parque eólico de Lotnisko<sup>1</sup>, é um projeto ganho pela CJR Wind - Polska, em parceria com a ALSTOM, com um valor aproximado de 33 Milhões de Euros. Está previsto que o parque fique operacional em 2016.

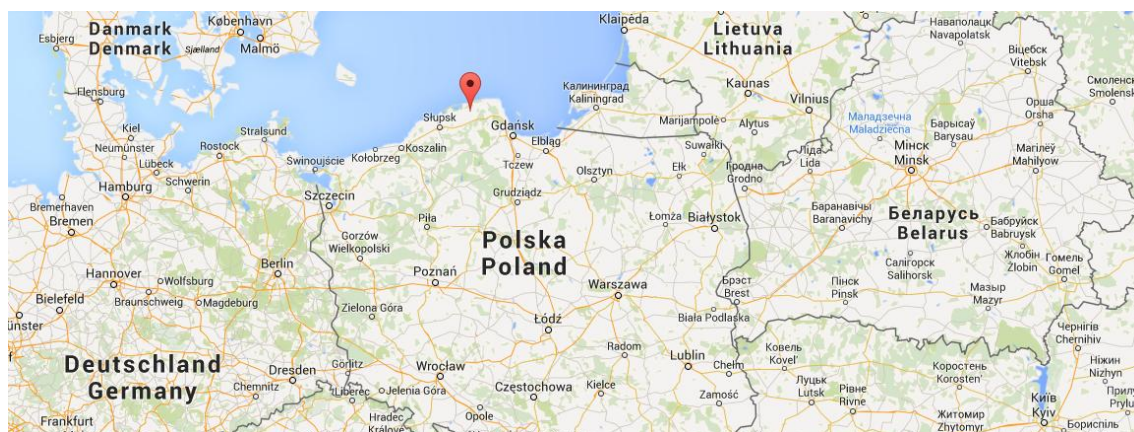


Figura 5-1- Localização geográfica do PE de Lotnisko

O projeto visa a construção de um parque constituído por 30 turbinas, ECO 110, pela subestação elevadora de Lotnisko e ligação à subestação de Zarnowieck, em cabo enterrado a uma distância de 40km.

O levantamento topográfico, da zona, pela qual a ligação entre as duas subestações será realizada, encontra-se no anexo A. Além disso, a disposição dos aerogeradores no parque, é apresentado no anexo B.

---

<sup>1</sup> PE de Lotnisko - A denominação é atribuída pela proximidade de uma base aérea militar, desativada, em Kopaniewo. Lotnisko, em português significa Aeroporto.

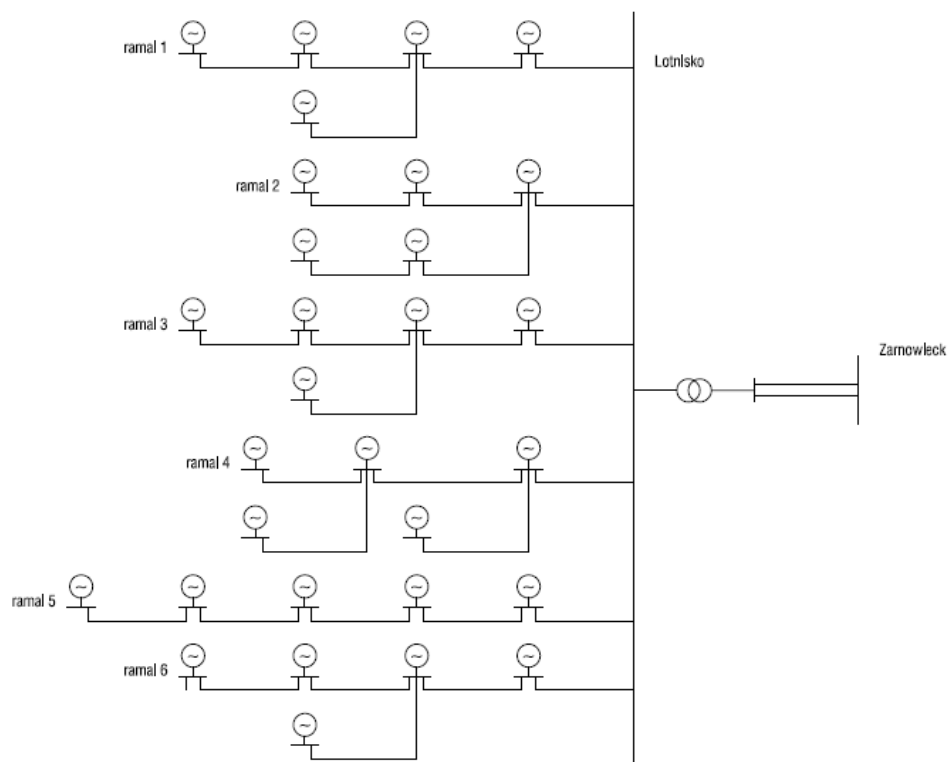


Figura 5-2- Esquema Geral do Parque de Lotnisko

## 5.1. Características do Parque

Como referido no capítulo 3, é necessário ter um conhecimento preciso da envolvente, das propriedades do solo e da influência que esta tem na corrente a transmitir. Deste modo, no caso de estudo, o solo apresenta as seguintes características, para as condições de instalação.

Tabela 5-1- Características do Solo - Lotnisko

Características do Solo	
Temperatura	20°C
Resistividade	1 K.m/W

Os cabos, instalados em valas, encontram-se a uma profundidade de cerca de 1 m, porém, nas imediações da turbina, a sua profundidade desce para uma profundidade entre 3m e 3.5m. As valas nestas zonas serão mais profundas do que o habitual (0.7m a 1.2m), provocado pela densidade de ferro das fundações, não permitindo a passagem dos cabos. Para corrigir esta situação, aumentou-se a cota de interligação, sendo esta realizada por baixo da fundação. No esquema da figura 5-3 é perceptível a medida aplicada.

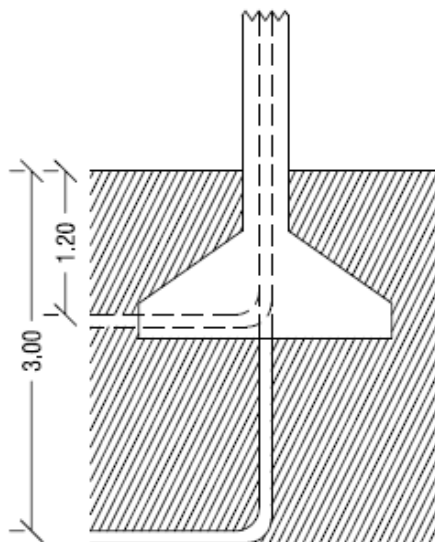


Figura 5-3- Medida adotada -Aumento da profundidade de colocação dos cabos

Além do trabalho de engenharia realizado na rede interna do parque, a obra inclui a interligação da subestação de Lotnisko à subestação de Kopaniewo, em AT ( $U_n = 110\text{kV}$ ), que se localiza a uma distância de 40km. A interligação vai ser em circuito duplo, em cabo enterrado. Entre várias condicionantes, a necessidade de recorrer ao enterramento do circuito de interligação, prende-se às condições atmosféricas sentidas naquela zona. É uma zona que apresenta temperaturas baixas, onde muitas das vezes há ocorrência de queda de neve.

## 5.2. Cabos, Turbinas e Transformador (Subestação de Lotnisko)

Neste subcapítulo será feita uma exposição das características dos cabos, turbinas e transformador da subestação de Lotnisko, contudo não serão disponibilizadas as *datasheets*, respeitando desta forma aspetos confidenciais, protegendo assim a CJR Wind e os contratos estabelecidos.

### 5.2.1. Cabos

A construção do parque de Lotnisko é constituída pela rede MT e rede AT, sendo, como previsível, a utilização de diferentes tipos de cabo. A empresa responsável pelo fornecimento dos cabos é a *Telefonika*.

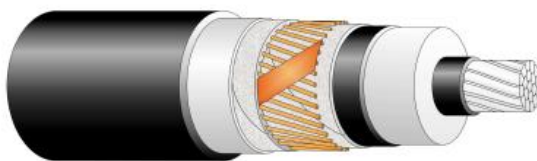


Figura 5-4- Cabo utilizado na rede de 30kV e 110kV [7]

Na Tabela 5-2 apresenta-se as características gerais do cabo de 30kV e do cabo AT, de 110kV.

Tabela 5-2- Informação Geral das características dos cabos de 30kV e 110kV [7]

Características	Cabo MT - XRUHAKXS	Cabo AT - XRUHAKXS
$U_0/U$ ( $U_m$ )	18/30 36 kV	18/110 115 kV
Material	Alumínio	
Bainha Exterior	Polietileno semiconductor	
Isolamento	XLPE	
Écran Metálico	Existe	

### 5.2.2. Turbinas

O contrato estabelecido compreende o fornecimento de 30 aerogeradores da ALSTOM, de modelo ECO 110.

Tabela 5-3- Características aerogerador ECO110

<b>ALSTOM - ECO 110</b>	
Posição do Rotor face à Torre	<i>Upwind</i>
Altura da Torre	90m
Diâmetro do Rotor	109.8m
Área Varrida pelo Rotor	-9500m <sup>2</sup>
Tipo de Torre	Tubular, em Aço
Sistema de Controlo	Velocidade Variável e Controlo de Pitch
Gerador	MIDA
Potência Nominal	3MW
Velocidade <i>cut-in</i>	3 m/s
Velocidade <i>cut-out</i>	25m/s



### 5.2.3. Transformador - Subestação de Lotnisko

A subestação de Lotnisko foi equipada com um transformador de 120 MVA, 110/30kV, da empresa ABB, cujo resumo de características necessárias aos cálculos a efetuar se encontra na tabela seguinte.

Tabela 5-4 Características do Transformador de Lotnisko

Transformador	
$S_n$	120 MVA
$U_{n1}/U_{n2}$	110/30 kV
$\Delta P_{Cu}$	44 kW
$u_{cc}$	11%

### 5.3. Rede de Média Tensão do Parque

A rede do parque de Lotnisko é constituída por 6 ramais, de 5 aerogeradores interligados entre si, totalizando assim as 30 turbinas. Na tabela 5-5 e 5-6 é apresentado o esquema da rede, nomeadamente da ligação dos aerogeradores entre si, com as informações relativas aos comprimentos de vala e denominação do tipo de vala. As informações presentes serão os *inputs* primários para o conhecimento do caso de estudo e início do dimensionamento elétrico. Para valas com comprimentos elevados a secção do cabo, teoricamente será superior, capaz de suportar as correntes. Associado a este ponto, o tipo de vala, ou seja, a existência de outros circuitos na proximidade influenciará também a intensidade a transmitir.

Tabela 5-5- Layout do Parque Lotnisko (parte1)

Rede Parque Lotnisko				
Ramal	WTG i	WTG j	Distância (m)	Tipo de Vala
Ramal1	<b>LOTNISK0</b>	EW21	1247	2
	EW21	EW24	618	3
	EW24	EW25	710	1
	EW24	EW23	954	2
	EW23	EW26	898	1
Ramal2	<b>LOTNISK0</b>	EW14	883	3
	EW14	EW13	1085	2
	EW13	EWD1	620	1
	EW14	EW17	724	3
	EW17	EW20	756	1
Ramal3	<b>LOTNISK0</b>	EW10	541	2
	EW10	EW5	853	3
	EW5	EW9	713	1
	EW5	EW1	642	2
	EW1	EWD2	621	1

Além de referido no capítulo 3, reforça-se a denominação de “tipo de vala”. As valas são numeradas, com 1, caso apenas circule um cabo neste; caso seja numerado com 2, refere-se à existência de 2 circuitos na vala, e assim sucessivamente.

Tabela 5-6 Layout do Parque Lotnisko (parte2)

Rede Parque Lotnisko				
Ramal	WTG i	WTG j	Distância (m)	Tipo de Vala
Ramal4	<b>LOTNISK0</b>	EW15	187	3
	EW15	EW16	920	1
	EW15	EW18	921	3
	EW18	EW19	658	1
	EW19	EW22	1012	1
Ramal5	<b>LOTNISK0</b>	EW12	1311	2
	EW12	EW8	1296	2
	EW8	EW4	893	2
	EW4	EWD4	527	2
	EWD4	EWD3	580	1
Ramal6	<b>LOTNISK0</b>	EW11	588	2
	EW11	EW6	752	3
	EW6	EW2	540	1
	EW6	EW7	720	2
	EW7	EW3	662	1

As distâncias apresentadas, nas tabelas anteriores, já consideram as alturas da torre e uma margem de 5% no comprimento da vala.

$$L_{TOTAL} = L_{vala} + 0.05 * L_{vala} + h_{TORRE}$$

## 5.4. Aplicativo desenvolvido “DIM\_WINDFARM”

O dimensionamento da rede interna do Parque segue o procedimento apresentado no Capítulo 3. Foi desenvolvido um algoritmo que permite otimizar o dimensionamento elétrico, de forma rápida e precisa para as secções dos cabos necessárias.

O aplicativo desenvolvido não engloba aspetos de otimização para a secção económica, respeitando desta forma, a confidencialidade da CJR Wind e das empresas associadas. A base de dados criada contém todos os parâmetros dos cabos, fatores de correção e parâmetros associados às turbinas.

O *Excel* associado ao *Visual Basic* serviu de base ao desenvolvimento da aplicação, capaz de otimizar processos. A escolha do *software* justifica-se pela existência de licenças na empresa, a qual não o poderia utilizar caso outro software fosse utilizado.

### 5.4.1. Algoritmo de Otimização

O algoritmo desenvolvido foi criado no sentido de realizar o dimensionamento elétrico de parques eólicos. O seu dimensionamento passa por várias fases, sendo que inicialmente, após os *inputs* serem inseridos, este realiza o dimensionamento técnico. O dimensionamento técnico divide-se no cumprimento da restrição de intensidade de corrente, secção necessária de cabo na ocorrência de um defeito, queda de tensão e perdas.

Numa segunda fase, é realizada uma otimização da secção do cabo. O processo engloba um ciclo de aumento de secção e verificação. Se o aumento implicar um decréscimo nas perdas iguais a 10% do valor anterior, a secção é aumentada; Se o aumento não for superior, mantêm-se a secção. O ciclo de iterações é realizado até se cumprir a restrição de perdas imposta.

Na figura 5-5 é apresentado o diagrama do processo criado.

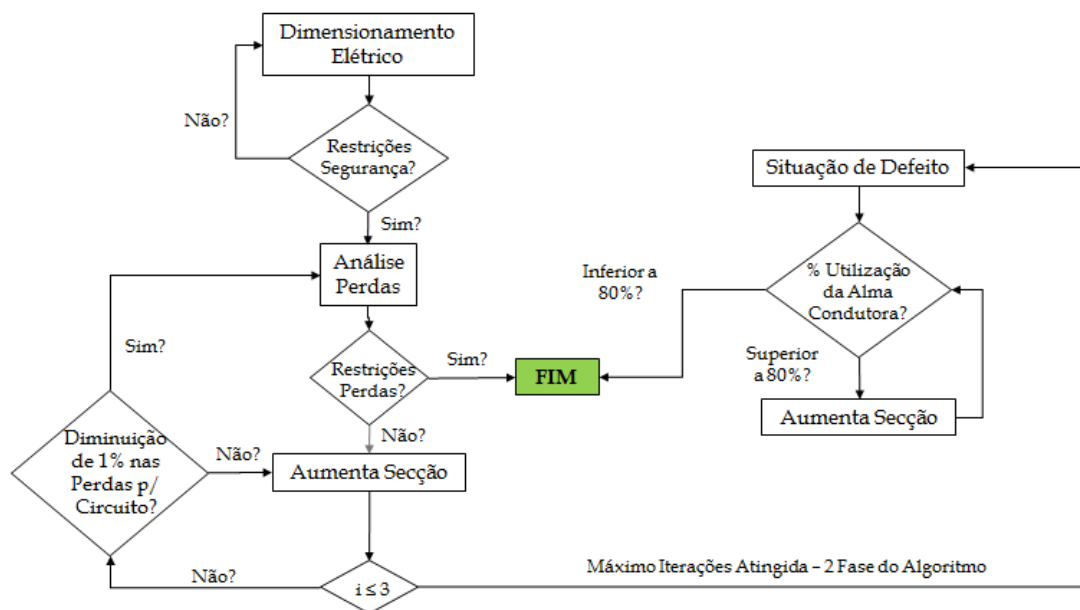


Figura 5-5 Algoritmo de Otimização da Secção do Cabo

#### 5.4.2. DIM\_WINDFARM

A ferramenta de dimensionamento é composta por várias folhas do *Excel*, sendo que apenas a folha de dimensionamento está ativa e disponível ao acesso do utilizador. As restantes folhas, como “Base de Dados”, “Dados”, “Curto Circuitos” e “Otimização da Secção” e “bateria de condensadores” são responsáveis pelas operações necessárias á obtenção do resultado final.

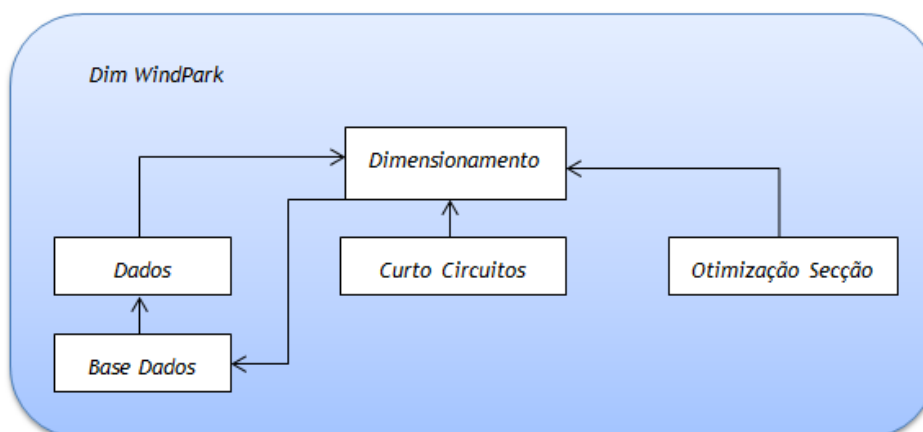


Figura 5-6- Esquema do funcionamento do aplicativo desenvolvido

- “Base de Dados”, responsável pelo armazenamento de todas as informações necessárias dos cabos, turbinas e fatores de correção da corrente.
  - A secção reservada para as informações dos cabos, como todos os seus parâmetros elétricos é constituída, de momento, pelos cabos *LXHIOV*, *LXHIV*, *LXH1AV*, *LXHIOAV*, *XHIV*, *XH1AV*, *XHIOV*, *XHIO1AV*, *XHIV*, *XRUHAKXS*.
  - Relativamente às turbinas presentes na base de dados, encontram-se as da ALSTOM ECO110 para as diferentes alturas de torre, e as VESTAS V80, V90, V100 E V110.
  - Os fatores de correção presentes estão associados aos “k”, ou seja, à influência da profundidade de colocação, resistividade do solo, temperatura do solo e tipo de vala (proximidade com outros circuitos).
- A folha de “dados” é responsável por armazenar as informações necessárias ao processo de cálculo. A definição de outra folha na ferramenta prende-se com a necessidade de, para redes grandes, o acesso à base de dados seja constante, tentando desta forma diminuir tempo de processamento.
- “Curto Circuitos” é a folha na qual o cálculo dos curtos circuitos é realizado, importando, posteriormente os resultados para a folha principal. Com esta opção não se sobrecarrega a folha principal com cálculos intermediários, facilitando uma análise rápida do dimensionamento.
- A folha “Otimização da Secção” realiza o processo de otimização da secção, em várias etapas, importando o resultado final para a folha principal.

Com base neste algoritmo, desenvolveu-se a ferramenta apresentada, na qual são introduzidos todos os “inputs” da rede.

The screenshot displays the main interface of the CJR WIND software. At the top, there are buttons for 'Criar Projeto' (Create Project) and 'Abrir Projeto' (Open Project), along with a 'Start' button. The interface is divided into several sections:

- Novo Dimensionamento:** Includes radio buttons for 'Ligação à Rede em Média Tensão' and 'Ligação à Rede em Alta Tensão'.
- Dados da Rede do Parque:** Fields for 'Corrente:', 'Frequência:', 'Tensão da Rede do Parque (kV):', 'Queda Tensão (%)', and 'Perdas (%)'.
- Parâmetros da Rede:** A field for 'I<sub>sc</sub> 3F (kA):'.
- Características do Cabo e Modo de Instalação:** Fields for 'Cabo:', 'Modo de Colocação:', and 'Disposição do Cabo:'. Below this is a section for 'Conversão - Normas Cabos Elétricos'.
- Fatores Correção:** Fields for 'Profundidade de Colocação:', 'Temperatura do Solo:', and 'Resistividade do Solo:'.
- Turbinas:** Fields for 'Marca:', 'Modelo:', 'Transformador - Sn (kVA):', 'Ucc (%):', and 'Perdas (kW):'.
- Transformador:** Fields for 'Sn (kVA):', 'Ucc (%):', 'Perdas (W):', 'TP', 'Sn (MVA):', 'Un2:', 'Ucc (%):', and 'Perdas(kW):'.
- Dimensionar Cabo Ligação à Rede:** Fields for 'Cabo:', 'Colocação:', 'Disposição:', 'K1', 'K2', 'K3', 'K4', and 'Distância (m):'.
- Dimensionamento Elétrico:** A large empty box for electrical dimensioning results.
- Correntes de Curto-Circuito:** A large empty box for short-circuit current results.
- Cabo Ligação à Rede:** A large empty box for connection cable results.

Figura 5-7- Aplicativo desenvolvido

Segundo a legenda seguinte,

1. Quadro de escolha entre abrir ou criar novo projeto;

This screenshot shows a simple selection interface with two radio buttons: 'Criar Projeto' (Create Project) and 'Abrir Projeto' (Open Project). To the right of these buttons is a 'Start' button.

Figura 5-8- Quadro Inicial

2. Escolhendo a opção “Criar Projeto”, abre-se uma janela na qual o utilizador pode inserir o layout do Parque;

The screenshot shows the 'Layout Parque Eólico' (Wind Farm Layout) window. It includes a 'Número de ramais existentes:' field and a 'Start' button. The main area is titled 'Layout do Parque Eólico' and contains four 'CJRwind Energy for life' logos arranged in a 2x2 grid. To the right of the logos are buttons for 'Inserir Dados' (Insert Data) and 'Limpar Campos' (Clear Fields). Below these is a section titled 'Parque Eólico' with a table for defining the layout:

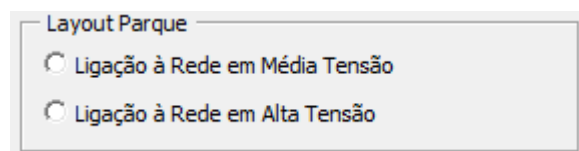
De	Para	Distâncias	WTG a Montante	Tipo de Vala

At the bottom right of the window is a 'Concluir' (Finish) button.

Figura 5-9- Definição do Layout do Parque

As áreas de inserção do *layout*, número de aerogeradores vistos de montante, distâncias e tipo de vala aparecem na zona no qual se encontra o logotipo da CJR Wind. A *Listview* apresentada à esquerda permite ao utilizador um acompanhamento do processo de introdução dos inputs. Após o processo concluído, o aplicativo reencaminha o utilizador para a janela principal, na qual se continua o processo de introdução dos parâmetros.

3. Quadro “Layout Parque”, no qual se escolhe a ligação à rede (MT ou AT);



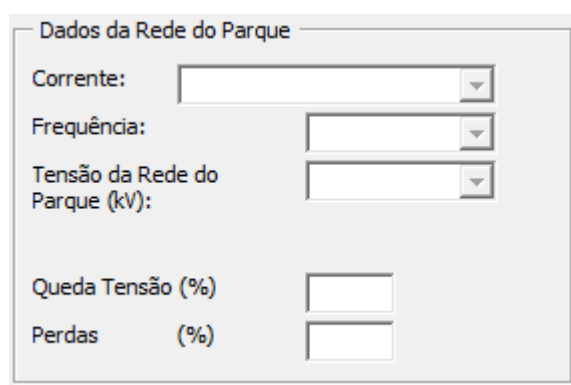
Layout Parque

☐ Ligação à Rede em Média Tensão

☐ Ligação à Rede em Alta Tensão

Figura 5-10- Escolha do tipo de ligação com a rede

4. Quadro “Dados da Rede do Parque”, onde o tipo de corrente, frequência de transmissão, tensão da rede, e valores de restrição de perdas e queda de tensão são introduzidos;



Dados da Rede do Parque

Corrente:

Frequência:

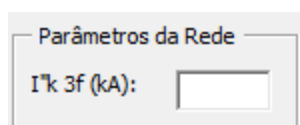
Tensão da Rede do Parque (kV):

Queda Tensão (%)

Perdas (%)

Figura 5-11- Dados da Rede

5. Quadro “Parâmetros da Rede”, no qual a corrente de curto circuito trifásica é especificada, sendo utilizada para o cálculo das correntes de curto circuito;



Parâmetros da Rede

$I''_{k\ 3f}$  (kA):

Figura 5-12- Parâmetros da Rede



6. Quadro “Características do Cabo e modo de instalação”. Neste quadro é escolhido o tipo de cabo, existente numa base de dados previamente criada. Além disso, a forma da instalação também é especificada. A *listview* denominada “Conversão - Normas Cabos Elétricos”, apresenta as características do cabo e a conversão para as normas Europeia, Americana e Asiática.

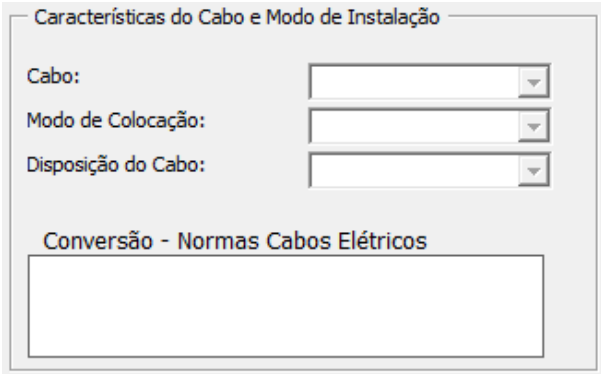


Figura 5-13- Características do Cabo e Modo de Instalação

7. No quadro “Fatores de correção”, são inseridos os inputs associados às condições da envolvente, como profundidade de colocação, temperatura do solo e resistividade termica do solo. Estes parâmetros são responsáveis por afetar as correntes de serviço;

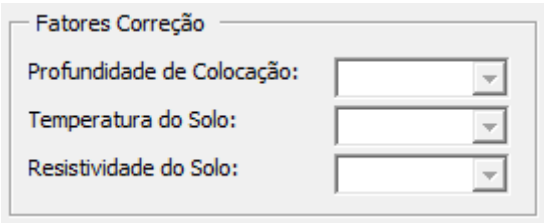


Figura 5-14- Fatores de correção

8. No quadro “Turbinas” são inseridas as características do aerogerador e associado ao aerogerador escolhido a base de dados construída retorna nos cálculos todos os parâmetros necessários desde altura da torre, potência nominal da máquina e fator potência.

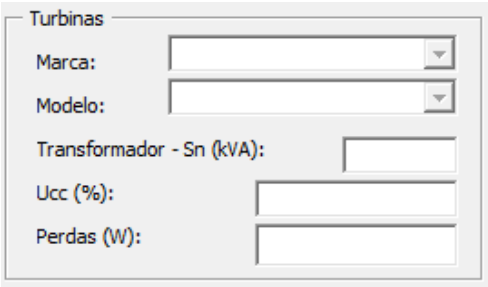


Figura 5-15- Escolha do tipo de turbina

9. O quadro “Transformador” engloba duas secções, nas quais se podem inserir os *inputs* do transformador de serviços auxiliares (TSA) e do transformador de potência (TP).

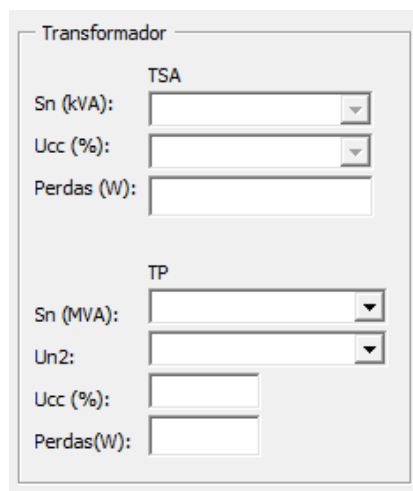


Figura 5-16- Definição das característica dos Transformadores

10. O quadro “Cabo AT - Ligação entre subestações” permite ao utilizador introduzir os dados necessários ao seu dimensionamento, como o cabo utilizado, a forma de aplicação, e os fatores de correção associados à envolvente.

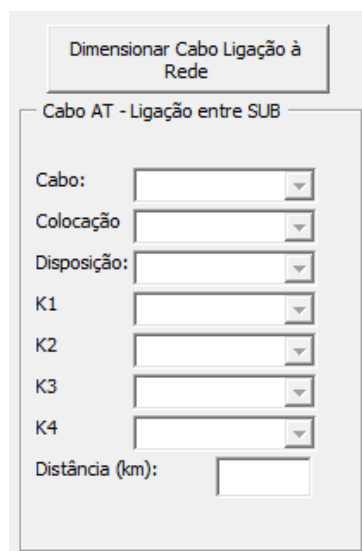


Figura 5-17- Definição dos inputs para o dimensionamento do cabo AT

O botão situado na parte superior do quadro permite ligar ou desligar a opção de dimensionamento, caso não seja necessário, por razões associadas aos contratos estabelecidos.

Concluído o processo de introdução de dados, a janela principal possui uma área de visualização dos resultados do dimensionamento, do cálculo das correntes de curto-circuito e do dimensionamento do cabo de ligação à rede.

### 5.4.3. INPUTS

Na tabela 5-7 encontra-se um resumo dos *inputs* da rede em estudo.

Tabela 5-7- Inputs para o dimensionamento

<i>Inputs</i>	
Ligação à rede	AT
Corrente	Alternada
Frequência	50Hz
Tensão Parque	30 kV
Queda tensão	3%
Perdas	1%
Corrente de Curto-Circuito Trifásica - Rede	42.4kA
Cabo	XRUHAKXS
Disposição	Enterrado
Colocação	Trevo
Profundidade colocação	1m
Temperatura do Solo	20°C
Resistividade térmica do Solo	1 K.m/W
Turbina	ALSTOM
Modelo da Turbina	ECO 110
Perdas (%)	1
<i>Sn</i> -Transformador	
Potência	120 MVA
Tensão secundário T.P.	110kV
Ucc (%)	11%
Perdas do T.P.	44kW

## 5.5. Resultados

Os resultados apresentados neste subcapítulo são baseados na formulação descrita no capítulo 3, para o dimensionamento elétrico da rede do parque de Lotnisko, e do capítulo 4, para o dimensionamento da bateria de condensadores.

### 5.5.1. Dimensionamento Elétrico do Parque de Lotnisko

No que respeita ao dimensionamento elétrico do parque, o processo compreende várias fases de análise, sendo o dimensionamento técnico a primeira fase. Desta forma, realiza-se a escolha das secções técnicas dos cabos, constituintes da rede MT, respeitando as restrições de corrente, queda de tensão e secção necessária ao curto-circuito.

Respeitando as restrições de segurança associadas à capacidade de transmissão da corrente, a corrente  $I_z$  que o cabo tem capacidade de transmitir tem que ser superior à corrente a transmitir, afetada dos fatores de correção.

$$I_z \geq I_s * \prod_{i=1}^4 k_i \quad [47]$$

A capacidade que o cabo tem em transmitir corrente está relacionado com a secção transversal deste. De facto verifica-se também que existem diferenças na capacidade de transporte do cabo mediante a sua instalação na vala, seja esta em Trevo ou Esteira. Mantendo o input “Disposição do cabo” como Trevo, o parâmetro a otimizar é a secção do cabo.

Além disso, há a necessidade de respeitar as quedas de tensão existentes no parque, tendo-se definido que estas não seriam superiores a 5%.

$$\Delta U \leq 5\% \quad [48]$$

A capacidade que o cabo tem em resistir ao aquecimento provocado pela ocorrência de um curto circuito, sem se danificar é também um parâmetro que restringe a secção do cabo a escolher.

$$Secção_{cabo} > Secção_{necessária \text{ numa situação de defeito}}$$

A tabela seguinte apresenta os resultados da primeira iteração realizada.

Tabela 5-8- Dimensionamento Elétrico (Técnico) - Lotnisko

Ligação	Secção (mm <sup>2</sup> )	In (A)	Iz(A)	ΔU (%)	Icc 3 (kA)	Secção Min (mm <sup>2</sup> )	Perdas (%)
LOTNISKO-21	185	288,6751	361,6	0,60	13,1	147,9979728	0,122226
21-24	150	230,9401	316	0,3	11,4	128,5054989	0,065233
24-25	120	57,73503	278,4	0,10	9,4	106,4721776	0,022615
24-23	120	115,4701	278,4	0,26	9,2	104,2854217	0,058949
23-26	95	57,73503	243,2	0,15	7,6	85,78180596	0,035289
LOTNISKO-14	240	288,6751	424	0,35	14,1	159,5438179	0,067882
14-13	150	115,4701	316	0,25	11,1	125,2804405	0,053995
13-D1	120	57,73503	278,4	0,08	9,5	107,6404303	0,020085
14-17	150	115,4701	316	0,17	11,7	131,8513162	0,037469
17-20	120	57,73503	278,4	0,10	9,8	110,1916226	0,023909
LOTNISKO-10	185	288,6751	361,6	0,28	14,4	162,4869785	0,057901
10-5	150	230,9401	316	0,403	11,9	134,4794802	0,086749
5-9	120	57,73503	278,4	0,10	9,8	110,7164366	0,0227
5-1	120	115,4701	278,4	0,18	10,0	113,3941468	0,041408
1-D2	120	57,73503	278,4	0,08	8,7	98,42730443	0,020114
LOTNISKO-15	240	288,6751	424	0,10	15,2	171,9484158	0,019549
15-16	150	57,73503	316	0,10	11,9	134,844346	0,023221
15-18	150	173,2051	316	0,32	12,2	137,779325	0,069731
18-19	120	57,73503	278,4	0,09	10,2	115,0326007	0,021154
18-22	120	57,73503	278,4	0,13	9,7	109,0059633	0,031105
LOTNISKO-12	185	288,6751	361,6	0,63	13,0	146,8141849	0,128057
12-8	150	230,9401	316	0,59	10,4	116,9343251	0,127308
8-4	120	173,2051	278,4	0,37	8,7	98,55238128	0,083279
4-D4	95	115,4701	243,2	0,18	7,7	86,62924717	0,044196
D4-D3	95	57,73503	243,2	0,10	6,7	76,2231302	0,023982
LOTNISKO-11	185	288,6751	361,6	0,30	14,3	161,4328425	0,062183
11-6	150	230,9401	316	0,36	12,0	135,7056866	0,077502
6-2	120	57,73503	278,4	0,07	10,1	114,6017106	0,017837
6-7	120	115,4701	278,4	0,20	10,0	112,9479662	0,045793
7-3	120	57,73503	278,4	0,09	8,6	97,56077039	0,021266

Analisando estes dados, por ramal, verifica-se que a influência destes, para o valor de perdas no parque, é bastante distinto. A tabela seguinte é um resumo da solução técnica, por ramal. As perdas totais no parque, para a solução obtida, são de 1.53%, o que corresponde a cerca de 150kW.

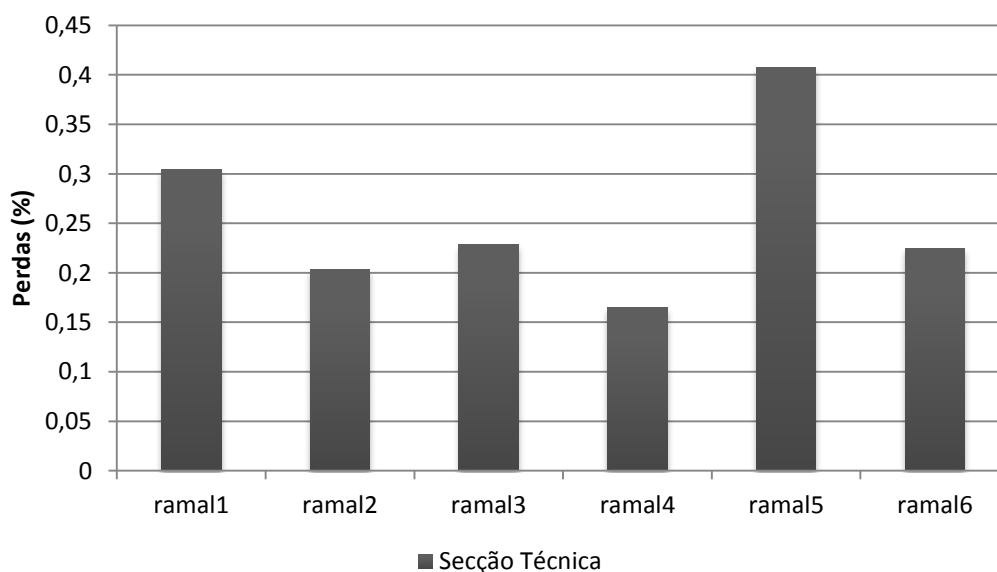
A solução foi obtida, considerando que o parque se encontra a produzir à sua capacidade máxima, ou seja, 90MW. O valor de perdas exigido, como já foi referido, é de 1% no parque, para uma velocidade média de vento de 8m/s, o que corresponde a 1.314MW por

aerogerador, totalizando no parque 39.5 MW. Para essa situação, o valor de perdas seria 0.67%, suficiente para cumprir a restrição, porém há necessidade de otimizar as secções dos cabos, conseguindo um valor de perdas reduzido, conseguindo obter uma rentabilização do recurso, para os vários regimes de funcionamento.

Tabela 5-9- Dimensionamento Elétrico Técnico

Ramal	L Ramal (m)	$\Delta U$ (%)	Perdas (%)
Ramal 1	4900	3.6	0.3043
Ramal 2	4540	1.96	0.2033
Ramal 3	3850	2.1	0.2289
Ramal 4	4200	1.54	0.1648
Ramal 5	5100	3.8	0.4068
Ramal 6	3750	2.1	0.2246

As perdas, por ramal, variam de forma distinta, como se pode verificar pela tabela anterior e pelo gráfico seguinte. Para os ramaís, com maior comprimento, as perdas são bastante superiores às obtidas nos outros ramaís, mais concretamente, o ramal 1 e o ramal 5.



Definindo as zonas a atuar, otimiza-se o dimensionamento, correndo o aplicativo desenvolvido. O algoritmo vai realizar um ciclo iterativo de aumento de secção e verificação de perdas, ou seja, aumenta e, caso esse aumento resulte numa diminuição de perdas de 10% do exigido (1%), a secção é aumentada. Caso não se obtenha essa melhoria, a secção mantém-se.

Tabela 5-10- Dimensionamento Elétrico (Otimizado) - Lotnisko

Ligação	Secção (mm <sup>2</sup> )	$\Delta U$ (%)	I <sub>cc</sub> 3f (kA)	Secção Min. (mm <sup>2</sup> )	Perdas (%)
LOTNISK0-21	240	0,49	13,6	153,7521953	0,09316
21-24	150	0,30	11,7	132,6444048	0,065233
24-25	120	0,10	9,7	109,4118423	0,022615
24-23	120	0,26	9,5	107,0461127	0,058949
23-26	95	0,15	7,8	87,67678567	0,035289
LOTNISK0-14	185	0,43	13,7	155,1221869	0,089061
14-13	120	0,29	10,5	118,5334082	0,066314
13-D1	120	0,08	9,1	102,6729216	0,020085
14-17	150	0,17	11,4	128,8402772	0,037469
17-20	120	0,10	9,6	108,1053079	0,023909
LOTNISK0-10	185	0,28	14,4	162,4869785	0,057901
10-5	150	0,40	11,9	134,4794802	0,086749
5-9	120	0,10	9,8	110,7164366	0,0227
5-1	120	0,18	10,0	113,3941468	0,041408
1-D2	120	0,08	8,7	98,42730443	0,020114
LOTNISK0-15	185	0,12	15,1	170,8999305	0,025648
15-16	150	0,10	11,9	134,2804769	0,023221
15-18	150	0,32	12,1	137,2155302	0,069731
18-19	120	0,09	10,2	114,6791215	0,021154
18-22	120	0,13	9,6	108,6637467	0,031105
LOTNISK0-12	240	0,51	13,5	152,7778803	0,097604
12-8	185	0,49	11,1	124,8813169	0,101352
8-4	150	0,31	9,4	106,4154622	0,067808
4-D4	95	0,18	8,2	92,67854531	0,044196
D4-D3	95	0,10	7,2	80,9532529	0,023982
LOTNISK0-11	185	0,30	14,3	161,4328425	0,062183
11-6	150	0,36	12,0	135,7056866	0,077502
6-2	120	0,07	10,1	114,6017106	0,017837
6-7	120	0,20	10,0	112,9479662	0,045793
7-3	120	0,09	8,6	97,56077039	0,021266

Otimizando a secção, as perdas no parque descem para 1.47%. Seria de esperar que, após a otimização realizada, pelo algoritmo, as perdas fossem inferiores a 1%. No entanto, não acontece essa situação, por imposição. Por outras palavras, os troços que apresentam mais perdas são os mais próximos da subestação de Lotnisko e o aumento de seção neste local resultaria sempre em decréscimos de superiores a 0.1%, e consequentes aumentos de secção, para duas ou três iterações. Deste modo, ressalva-se que o aplicativo desenvolvido, não é a solução, mas sim uma solução a considerar para o dimensionamento.

Por ramal, os resultados obtidos são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 5-11- Perdas por Ramal - Dimensionamento Elétrico Otimizado

Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3	Ramal 4	Ramal 5	Ramal 6
0.28	0.24	0.23	0.17	0.33	0.22

Numa segunda fase de abordagem ao dimensionamento elétrico, considerou-se a secção mínima necessária, numa situação de defeito. A alma condutora, do cabo de energia, numa situação de defeito, vai ser sujeito a correntes bastante elevadas, na ordem dos 10kA. A passagem deste nível de corrente no cabo, levará a elevadas perdas por efeito de joule.

Desta forma, criou-se um novo processo de otimização de secção e consequente diminuição de perdas. Uma utilização de secção da alma condutora superior a 80%, para as situações de defeito, implica aumento de secção.

Tabela 5-12- Dimensionamento Elétrico - 2ª Fase de Otimização

Ramal	Secção	Secção Min.	% Utilização	Secção Otimizada II	Perdas por Ramal
LOTNISKO-21	240	157,72	66%	240	0.24
21-24	150	135,48	90%	185	
24-25	120	111,42	93%	150	
24-23	120	108,92	91%	150	
23-26	95	88,96	94%	120	
LOTNISKO-14	185	155,12	84%	240	0.19
14-13	120	118,53	99%	150	
13-D1	120	102,67	86%	150	
14-17	150	128,84	86%	185	
17-20	120	108,10	90%	150	
LOTNISKO-10	185	162,487	88%	240	0.18
10-5	150	134,479	90%	185	
5-9	120	110,716	92%	150	
5-1	120	113,394	94%	150	
1-D2	120	98,427	82%	150	
LOTNISKO-15	185	171,948	93%	240	0.13
15-16	150	134,844	90%	185	
15-18	150	137,779	92%	185	
18-19	120	115,033	96%	150	
18-22	120	109,006	91%	150	
LOTNISKO-12	240	156,903	65%	240	0.32
12-8	185	131,711	71%	185	
8-4	150	108,771	73%	150	
4-D4	95	94,471	99%	120	
D4-D3	95	82,343	87%	120	
LOTNISKO-11	185	161,433	87%	240	0.18
11-6	150	135,706	90%	185	
6-2	120	114,602	96%	150	
6-7	120	112,948	94%	150	
7-3	120	97,561	81%	150	



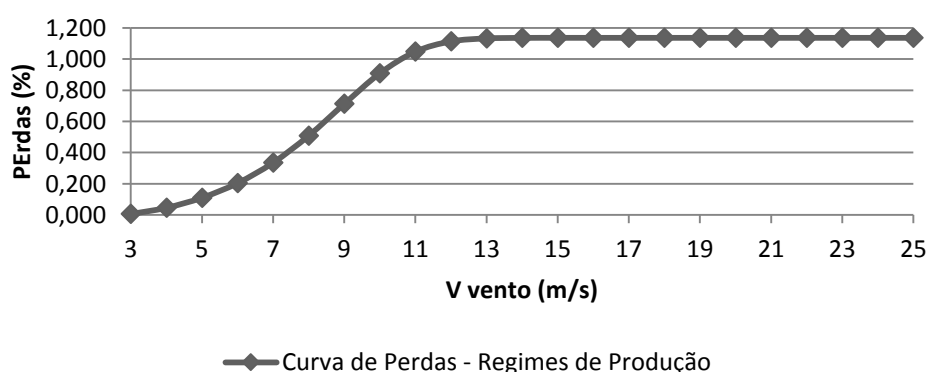
A solução obtida necessita de mais uma iteração, nos ramais 2, 3, 4 e 6, conforme o apresentado na tabela seguinte. Com base na otimização baseada na utilização da alma condutora, as secção de 150mm<sup>2</sup> passam para 185mm<sup>2</sup>. O valor de perdas passa de 1.24% para 1.21%.

Ramal	Troço	Secção	% Utilização
Ramal 2	14-13	150	84
Ramal 3	5-1	150	80
Ramal 4	18-19	150	80
Ramal 6	6-2	150	80

Esta solução, é de facto, bastante interessante, com valores de perdas reduzidos, para um funcionamento à plena carga, ou seja, para um regime de funcionamento máximo, temos um valor de perdas superior, cerca de 20% superior ao exigido, para um regime de vento de 8m/s. Este regime de vento corresponde a cerca de 40% de disponibilidade de produção do parque do parque. A solução final é resumida seguidamente.

	Ramal 1 (mm <sup>2</sup> )	Ramal 2 (mm <sup>2</sup> )	Ramal 3 (mm <sup>2</sup> )	Ramal 4 (mm <sup>2</sup> )	Ramal 5 (mm <sup>2</sup> )	Ramal 6 (mm <sup>2</sup> )
	240	240	240	240	300	240
	185	185	185	185	240	185
	150	150	150	185	185	185
	185	185	185	185	150	150
	150	150	150	150	150	150
Perdas (%)	0.24	0.18	0.17	0.13	0.32	0.17
Perdas (%) Final	0.22	0.18	0.17	0.13	0.25	0.17

A solução final, apresentada na tabela anterior, apresenta perdas no parque de cerca de 1.13%. Para os vários regimes de produção, as perdas no parque são apresentadas no gráfico seguinte.



Como se observa pelo gráfico anterior, para a velocidade de vento de 8m/s, as perdas verificadas no parque são bastante inferiores às exigidas em contrato.

#### 5.5.1.1. Conclusões

O estudo das perdas no parque de Lotnisko passou por várias fases de otimização. Numa primeira fase, há o cumprimento técnico, identificando-se claramente as zonas críticas do parque. Posteriormente, corre-se o aplicativo, no sentido de obter uma solução muito próxima da final, e como já foi explicado anteriormente, o algoritmo desenvolvido não é a solução, mas sim o caminho a seguir no dimensionamento elétrico. Há questões associadas ao investimento e contratos estabelecidos, que não são compreendidas no ciclo de iteração, que influenciam a decisão.

Numa fase final de otimização, há uma análise centrada na capacidade da alma condutora resistir de forma mais ou menos eficaz a correntes de curto circuito, ou seja, a percentagem de solicitação da secção da alma condutora nestas situações. Para uma percentagem de utilização acima de 80%, a secção é aumentada, respeitando sempre o funcionamento técnico. Desta forma, consegue-se reduzir as perdas em cerca de 0.35%, o que corresponde a uma redução no desperdício de 50kW.

No fim do processo de redução de perdas, de forma equilibrada e sustentada, há necessidade de confrontar a solução adotada com os parâmetros associados ao investimento.

#### 5.5.2. Dimensionamento de bateria de condensadores

Da análise efetuada ao Parque de Lotnisko, e considerando as necessidades de potência reativa no ponto de conexão com a rede, há necessidade de inserir baterias de condensadores.

Desta forma, e segundo o formulado no capítulo 4, a primeira fase será de identificação da quantidade de potência reativa requerida pela rede, para os períodos de funcionamento - cheia e vazio. Posteriormente, a capacidade que o parque possui, sem aparelhagem auxiliar, de cumprir com a legislação.

Para o período “Horas de Ponta”, o parque tem que ter capacidade de fornecer à rede, uma quantidade de potência reativa, segundo um fator de potência de 0.98. Para o período “Horas de Vazio” o fator de potência toma o valor de 1. O não cumprimento dos fatores de potência exigidos, impõe o pagamento à rede de uma taxa, sobre o excesso ou défice no fornecimento de potência reativa.

O Parque de Lotnisko, com uma potência instalada de 90MW, apresenta capacidade de:

Tabela 5-13- Níveis de Potência Reativa no ponto de ligação à rede

Potência Reativa (Mvar)	
Capacitivo	18
Indutivo	18

As zonas a analisar no Parque de Lotnisko são os aerogeradores, os transformadores dos aerogeradores, a rede de média tensão, o transformador da subestação de Lotnisko e a rede de alta tensão, responsável pelo transporte de energia até Kopaniewo - Rede.

De referir que o dimensionamento efetuado é realizado para um funcionamento do parque a plena carga, ou seja, para o pior caso.

Tabela 5-14- Rácio de Potência Reativa no Parque de Lotnisko

Zonas	Q capacitivo (Mvar)	Q indutivo (Mvar)
WTG	42.6	-
Transformador WTG	-	27
Rede MT	-	0.096
Transformador Lotnisko	-	0.22
Rede AT	-	4.99

Os valores apresentados não variam com as necessidades de energia da rede, ou por outras palavras, com os períodos de funcionamento - Ponta e Vazio. Por outro lado, a influência dos períodos horários associam-se às necessidades de rede.

Tabela 5-15- Capacidade das Baterias de Condensadores para os diferentes períodos horários

Período	Parque Lotnisko (Mvar)	Rede (Mvar)
Horas Ponta	7.9 ind.	18
Horas Vazio	10.1 cap.	0

Deste modo, para as Horas de Ponta, há a necessidade de compensar a quantidade de potência reativa, sendo necessário injetar além dos níveis de potência reativa existentes no parque, mais 7.9 Mvar. Nas Horas de Vazio, visto que não se pode injetar potência reativa na rede, as baterias de condensadores terão que ter capacidade de armazenar 10.1 Mvar.

#### 5.5.2.1. Conclusões

Estabelecidas as necessidades da rede, no que respeita aos níveis de potência reativa, e as zonas que a consomem e injetam, define-se que o parque necessita de realizar a compensação de potência reativa. Como referido, o Parque necessita, nas horas de ponta, de injetar 7.90Mvar e nas horas de vazio, armazenar o excesso, correspondendo a 10.1Mvar.

É necessário compreender os aspetos tarifários associados ao pagamento, pelo excesso e défice de potência reativa, no ponto de ligação com a rede elétrica. Além disso, o conhecimento do comportamento do recurso eólico tem que ser estabelecido, através das medições e previsões efetuadas. Concretamente, a necessidade de investimento nas baterias de condensadores, de forma a realizar esta compensação, de forma completa, pode não compensar, em termos de investimento a longo prazo. Uma solução a adotar pode passar por uma compensação parcial e o pagamento, à rede, do excesso ou défice de potência reativa, suportado pelo comportamento do recurso eólico e pelo valor das tarifas.

As baterias de condensadores, do parque de Lotnisko, terão que ter uma capacidade superior a 10.1Mvar.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1. Conclusões

O principal motivo do presente trabalho foca-se no desenvolvimento de um procedimento de otimização de perdas e estudo das necessidades de compensação de níveis de potência reativa em parques eólicos, possibilitando a CJR Wind, de uma tomada de decisão mais ampla e próxima da realidade, de uma forma eficaz e rápida, no que respeita ao aspetos do dimensionamento elétrico dos parques em estudo.

O início do processo de realização da dissertação prendeu-se numa adaptação à empresa CJR Wind, através do conhecimento dos procedimentos de trabalho, normas regulamentares adotadas e técnicas utilizadas na programação de trabalho, de forma a proceder a um trabalho objetivo.

Permitindo o enquadramento no tema, foi realizado um estudo de índole teórica acerca do estado atual e evolução das energias renováveis em Portugal e no Mundo. Além do enquadramento efetuado, abordou-se questões associadas às tecnologias de aerogeradores, seus constituintes e a constituição típica das subestações e aparelhagem que a constitui.

Neste estudo, confirma-se a aposta no crescimento da quota de energia renovável. A Europa desempenha um papel protagonista no mercado renovável, através da adoção de medidas e imposições, responsáveis por impulsionar o crescimento energético sustentável dos países, diminuindo as emissões de gases poluentes, entre outros aspetos de índole ecológica. Relativamente às tecnologias mais típicas, nos dias de hoje, os aerogeradores equipados com máquinas de indução duplamente alimentadas, são mais usados. Destacam-se pela sua capacidade de controlo da velocidade e comportamento dinâmico em diferentes níveis de produção.

Os objetivos principais da presente dissertação, focam-se nas perdas existentes em parques eólicos e respetivos níveis de potência reativa. As perdas verificadas em parques eólicos ocorrem principalmente por efeito de Joule e no núcleo dos transformadores.

Contudo, verifica-se também a existência de perdas não técnicas, associadas à não contabilização de toda a energia produzida e entregue à rede. Este tipo de défice na contabilização de energia é provocado por erros na aparelhagem, responsável pelas medições e contagem de energia. No que respeita à quantidade de potência reativa, nos parques, é necessário que este cumpra as imposições legais, de cada país em estudo. Para uma correta compensação de potência reativa, é necessário o conhecimento dos pontos, nos quais se verifica injeção e/ou consumo, e o seu impacto na rede interna. Além disso, a potência reativa desempenha o papel de suporte dos níveis de tensão nos barramentos do parque, o que implica uma capacidade de resposta em situações de defeito. É imperativo, nos novos parques eólicos, a capacidade de resistir a um aumento ou diminuição intempestiva das tensões.

O caso de estudo é um parque eólico na Polónia, tendo sido o seu dimensionamento direcionado às condições verificadas naquele local. No entanto, o processo de desenvolvimento da ferramenta de dimensionamento elétrico teve sempre em consideração o seu uso para o dimensionamento de qualquer parque, sendo ele de pequenas ou grandes dimensões. A ferramenta é dinâmica, tal como a base de dados criada, desenvolvida de maneira a poder ser evoluída. O utilizador será capaz de otimizar o dimensionamento elétrico, encontrando soluções que se adequem às suas necessidades, nomeadamente diminuir as perdas existentes no parque, procurando sempre um equilíbrio entre o rentável e o eficaz.

Conclui-se que o algoritmo desenvolvido permite o cumprimento técnico das imposições de dimensionamento elétrico, permitindo uma otimização do desperdício de energia sentido em parques eólicos. De referir também que a ferramenta desenvolvida não é a resposta ao problema de otimização, contudo permite aproximar o engenheiro de uma solução. A solução final é o equilíbrio entre o investimento realizado, os contratos estabelecidos e o respeito dos parâmetros elétricos, sendo o Engenheiro, o responsável pela “arte e engenho” no dimensionamento elétrico final.

Na segunda fase do trabalho desenvolvido, abordou-se o tema do trânsito de potência reativa na rede interna do parque eólico. De forma a respeitar as imposições no equilíbrio da mesma, para os diferentes estados de funcionamento, vazio e plena carga, é necessário o equilíbrio através do consumo ou injeção de potência reativa. O estudo centrou-se no dimensionamento de baterias de condensadores, o qual é realizado através da ferramenta desenvolvida.

As soluções obtidas, para o dimensionamento elétrico e respetiva otimização das perdas, são bastante positivos. Conseguiu-se realizar uma otimização equilibrada das perdas no parque de Lotnisko, através das várias fases de estudo efetuadas, sem menosprezar os aspetos económicos. A solução obtida apresenta uma percentagem de perdas máxima de 1%, para os vários regimes de produção.

## 6.2. Trabalhos Futuros

De modo a se obter resultados cada vez melhores e de forma a simplificar determinados processos, em trabalhos futuros, existem pontos que poderão ser alvo de um aprofundamento.

Relativamente ao processo de dimensionamento elétrico do parque, o melhoramento da base de dados, do ponto de vista de informação, quer em cabos, quer em tipos de aerogeradores utilizados, seria uma mais valia. Além da questão quantitativa, questões económicas deverão ser incluídas também na base de dados, permitindo um dimensionamento otimizado e sustentável economicamente.

Outra questão a ter em consideração, é a reestruturação da base de dados, que permitirá o desenvolvimento de uma base de dados mais robusta e dinâmica, que funcione em paralelo com as ferramentas criadas e não seja parte desta. Um caminho a seguir será a utilização da Microsoft Access, que permitirá uma reformulação do código criado.



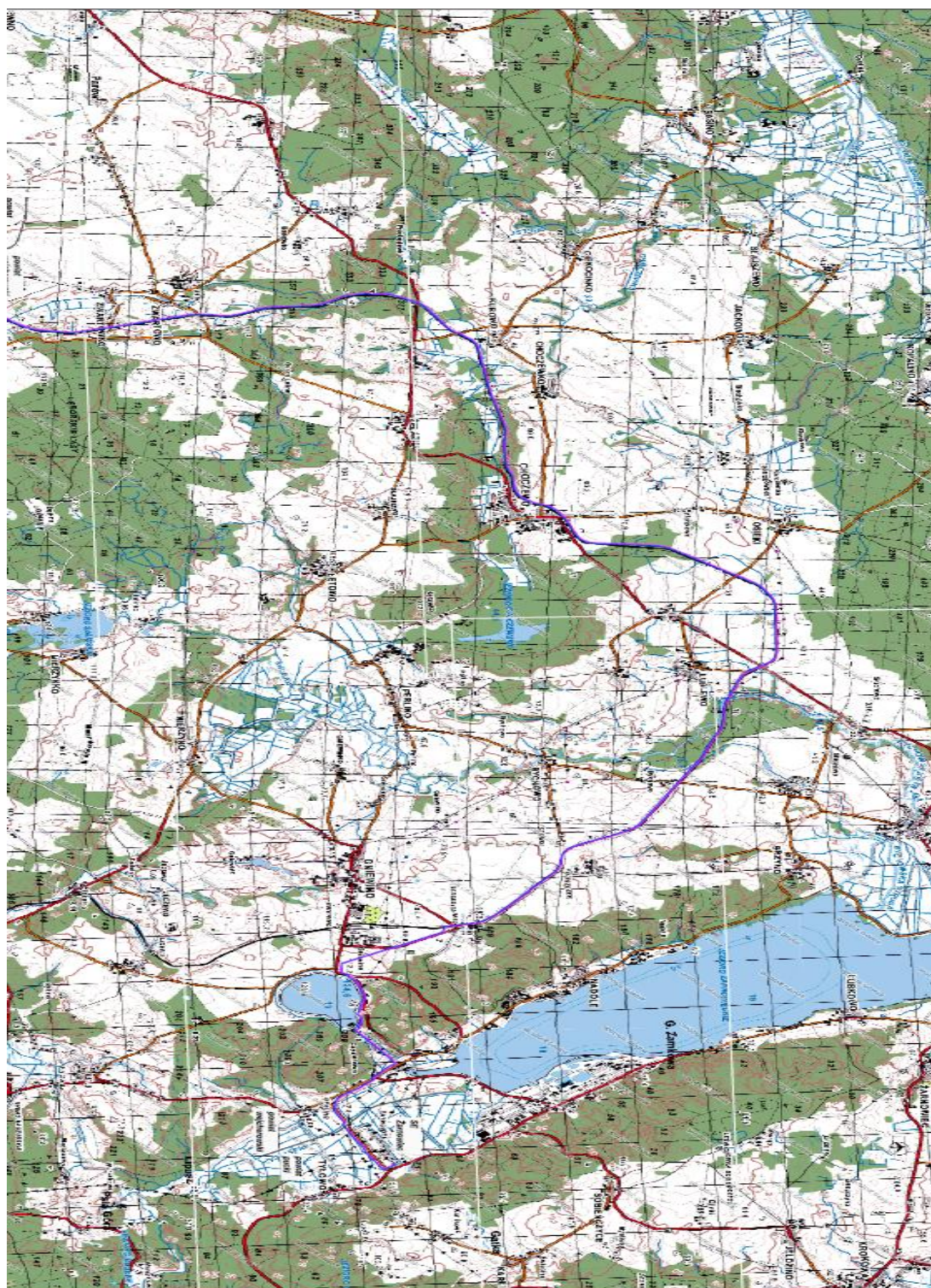


## Referências

- [1] Rui Castro, Uma introdução às energias renováveis- Eólica, Fotovoltaica e Mini-Hídrica.
- [2] José Pedro Sucena Paiva, Redes de energia elétrica- Uma análise sistémica.
- [3] Guia Técnico Solidal. Disponível em: <http://www.solidal.pt/?m=217&c=14>.
- [4] Formulário para elaboração de Parques Eólicos. Disponível em:  
[http://www.paginas.fe.up.pt/~ee99088/Formulario\\_Gamesa.pdf](http://www.paginas.fe.up.pt/~ee99088/Formulario_Gamesa.pdf).
- [5] J. Neves dos Santos, Canalizações Elétricas - 3º Ano - IELE.
- [6] Pedro Correia, Projeto e Construção de Subestações AT/MT de Distribuição de Energia Elétrica - Guia Técnico.
- [7] Tabelas Técnicas, Fábrica Nacional de Condutores Elétricos - S.A.R.L..
- [8] TF-Kable - Wind Energy Cables. Disponível em:  
[http://www.tfkable.com/sites/default/files/katalogi/clean\\_energy.pdf](http://www.tfkable.com/sites/default/files/katalogi/clean_energy.pdf).
- [9] Vladimiro Miranda, Escolha Inteligente de secções de cabos elétricos, Versão 3.0 - Março 2009.
- [10] Portaria n.º 596/2010 de 30 Julho.
- [11] IEEE, Fault current contributions from wind plants.
- [12] IEEE, James K. Niemira, Wind plant protective relaying.
- [13] Comissão Eletrotécnica Internacional - Norma 60502.
- [14] Comissão Eletrotécnica Internacional - 60909.
- [15] Comissão Eletrotécnica Internacional - 60949.



## Anexo A







## Anexo B



